

## ОПТИЧЕСКАЯ ИНДИКАЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ВХОДНОМ КОНТРОЛЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

А. Б. Захаренко, А. К. Надкин,  
С. А. Мартынова, В. Т. Семенов

*Рассмотрены требования к входному контролю постоянных магнитов. Описан метод входного контроля постоянных магнитов, отвечающий требованиям по скорости, дешевизне и высокой достоверности. Предложено устройство для оптической индикации магнитного поля постоянных магнитов, с целью проведения предварительного экспресс-анализа. Оптический способ индикации магнитного поля реализуется с использованием индикаторной емкости, заполненной магнитной жидкостью. Для анализа наличия магнитного поля у контролируемой детали частицы магнетита сконцентрируются вблизи контролируемой детали вдоль силовых линий магнитного поля. Проведен эксперимент по определению порога чувствительности индикатора магнитного поля. В рамках эксперимента рассмотрен электромагнит. Регулируя ток в обмотке электромагнита, была подобрана минимальная величина интенсивности магнитного поля, при которой наблюдается непрозрачное пятно в индикаторной емкости. Описанный способ актуален при наличии магнитного поля с индукцией 20 мТл.*

**Ключевые слова:** индикация магнитного поля, магнитная жидкость, индикаторная емкость, порог чувствительности, оптический способ индикации магнитного поля.

Намагниченные детали из магнитотвердых материалов широко применяются в различных отраслях промышленности. В частности, постоянные магниты применяются для возбуждения синхронных электрических машин и машин постоянного тока. Изготавливают постоянные магниты обычно специализированные организации. При поставке постоянных магнитов на предприятия-изготовители электрических машин проводится входной контроль постоянных магнитов.

К входному контролю обычно предъявляются следующие требования:

- сравнительно большая скорость контроля;
- сравнительная дешевизна контроля;
- высокая достоверность (надежность) контроля и др.

Целью настоящей статьи является создание метода входного контроля постоянных магнитов, отвечающего вышеприведенным требованиям.

Для обеспечения требования о скорости входного контроля необходимо создать метод входного контроля, состоящий из двух частей:

1) предварительный экспресс-анализ намагниченности постоянных магнитов оптическим способом индикации магнитного поля;

2) измерение магнитного поля постоянных магнитов с помощью измерительного прибора, например, тесламетра.

Известен ряд попыток создания способа по п. 1. Например, в работе [1] описан индикатор конфигурации магнитного поля. Его суть в наличии герметичного корпуса с прозрачной крышкой, в котором расположены ферромагнитные опилки из магнитомягкого материала с возможностью их свободного перемещения по основанию корпуса. По мнению автора, по расположению опилок можно судить о намагниченности закрепленного на корпусе постоянного магнита. К сожалению, конструкция индика-

тора на основе ферромагнитных опилок не позволяет сделать его достаточно чувствительным для индикации магнитных полей с индукцией менее 50 мТл.

Широко распространена магнитная жидкость [2], которая представляет собой устойчивую коллоидную систему, состоящую из ферромагнитных частиц нанометровых размеров. Примерный размер ферромагнитных частиц обычно достигает 8 – 12 нм. Магнитная жидкость является стабилизированной поверхностно-активными веществами дисперсией магнетита в специальной жидкости в виде однородной массы коричневого цвета. В качестве дисперсионной среды магнитной жидкости часто используется керосин.

Способы измерения магнитного поля постоянных магнитов с помощью измерительного прибора достаточно подробно описаны в статьях [3 – 5]. Наиболее оптимальным является использование специальной оснастки для имитации магнитной системы электрической машины. Оснастка может иметь форму параллелепипеда [3] или цилиндрическую форму [4, 5].

Объектом данной работы является оптический способ индикации магнитного поля.

Задачей настоящей работы является создание оптического способа индикации магнитного поля контролируемой детали, например, постоянного магнита, который может находиться в намагниченном или ненамагниченном состоянии. В ряде случаев индикация магнитного поля магнитной детали (или постоянного магнита) путем ее взаимодействия с магнитомягким материалом затруднена: из-за больших размеров детали или большой величины магнитной силы, или большого количества постоянных магнитов, подлежащих входному контролю. Этот способ должен быть:

– достаточно простым и реализовываться без применения сложных измерительных схем и устройств;

– быть пригодным для индикации постоянного и переменного магнитного поля.

Оптический способ индикации магнитного поля реализуется с использованием индикаторной емкости, заполненной магнитной жидкостью (рис. 1). Для реализации предлагаемого оптического способа индикации магнитного поля необходимо:

1. Создать индикаторную емкость, заполненную магнитной жидкостью, эскиз которой приведен на рис. 1: **1** – индикаторная емкость; **2** – магнитная жидкость; **3** – магнитная жидкость с повышенной концентрацией магнетита у источника магнитного поля; **4** – намагниченный постоянный магнит (источник магнитного поля). Индикаторная емкость должна быть выполнена в виде герметичного параллелепипеда из прозрачного пластика или стекла. При этом наименьший размер герметичного параллелепипеда – размер  $b$  – должен быть выбран таким образом, чтобы свет проходил сквозь заполненную магнитной жидкостью индикаторную емкость в направлении этого размера. Иными словами, обеспечивалась его прозрачность в этом направлении, индикаторная емкость являлась коричневым прозрачным фоном для контролируемой детали. На практике, например, для магнитной жидкости МЖ-43 (производитель – Белорусский национальный технический университет) этот размер не должен превышать 1 мм ( $b \leq 1$  мм).

2. Для анализа наличия магнитного поля у контролируемой детали необходимо приблизить деталь к индикаторной емкости в направлении размера  $b$  на расстояние, примерно равное  $b$  или соизмеримое с ним, или разместить ее непосредственно на индикаторной емкости. При наличии магнитного поля контролируемой детали частицы магнетита сконцентрируются вблизи контролируемой детали вдоль силовых линий магнитного поля. При направлении вектора намагниченности контролируемой детали, совпадающем с размером  $b$ , частицы магнетита (а не ферромагнитные опилки, как у аналога) образуют в индикаторной емкости непрозрачное пятно **3** (рис. 1, *a*), повторяющее контур контролируемой намагниченной детали, или группируются вокруг нее (рис. 1, *б*) при размещении намагниченной детали **4** (постоянного магнита) непосредственно на индикаторной емкости. В случае если деталь не намагничена, индикаторная емкость остается прозрачной. По наличию непрозрачного пятна происходит оптическая индикация наличия магнитного поля контролируемой детали.

Для определения порога чувствительности предлагаемого способа рассмотрен электромагнит, показанный на рис. 2.

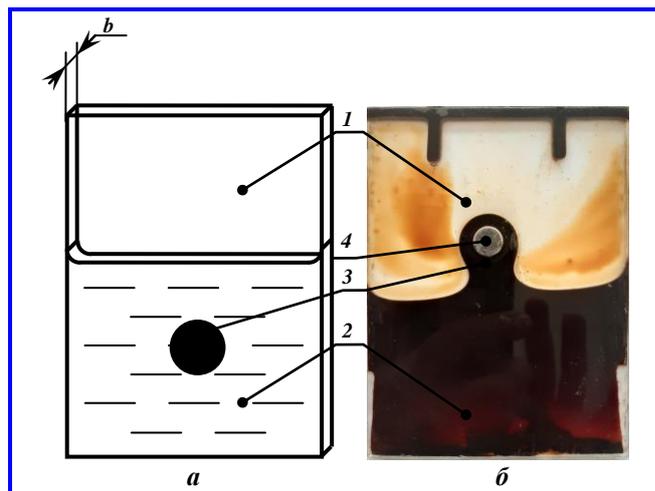


Рис. 1. Индикаторная емкость для реализации оптического способа индикации магнитного поля

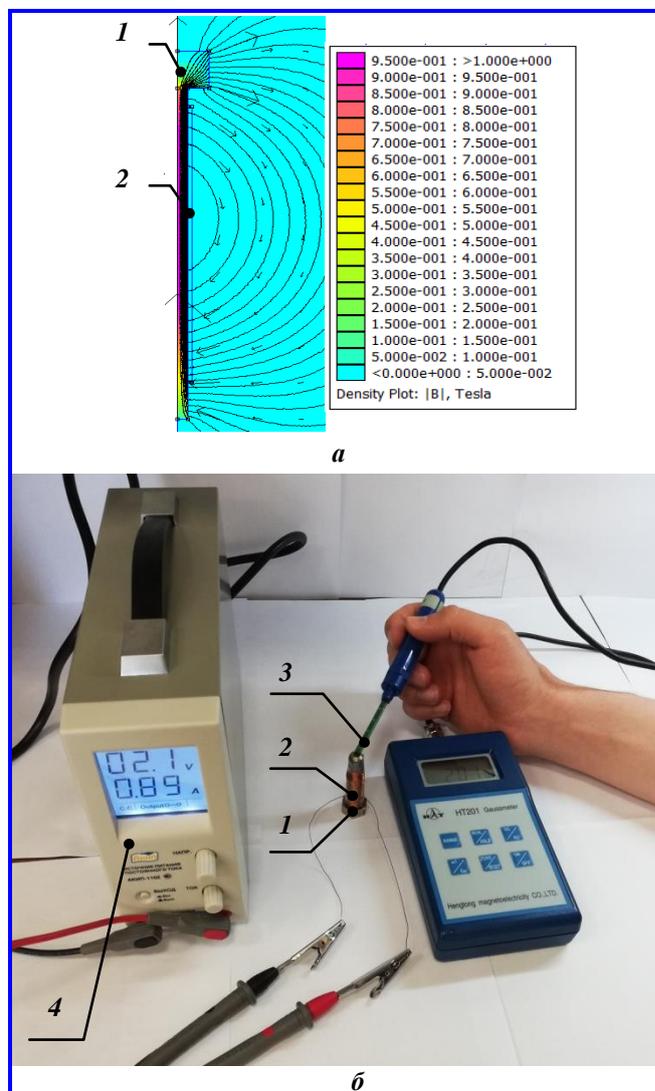


Рис. 2. Осесимметричная модель (*a*) и макет (*б*) для определения чувствительности индикатора магнитного поля: **1** – сердечник; **2** – обмотка; **3** – щуп тесламетра; **4** – источник постоянного тока

На магнитомягкий сердечник намотана обмотка из изолированного медного провода. При пропускании тока по обмотке создается магнитный поток, наличие которого фиксируется с помощью предлагаемого индикатора (рис. 1, б). Таким образом, регулируя ток в обмотке, можно подобрать минимальную величину интенсивности магнитного поля, при которой наблюдается непрозрачное пятно в индикаторной емкости. Значение интенсивности поля может быть зафиксировано с помощью тесламетра.

При значениях тока 0,5; 3; 5 А значение магнитной индукции на торцевой поверхности сердечника составляет 12, 50, 100 мТл соответственно.

В программной среде FEMM была создана осесимметричная магнитоэлектростатическая модель рассматриваемой магнитной системы (рис. 2, а) и проведен расчет поля. На рис. 3 показан график распределения нормальной составляющей индукции  $B$  на торцевой поверхности сердечника в радиальном направлении  $r$ , где значение 0 по оси абсцисс совпадает с осью симметрии сердечника.

По характеру графика видно, что поле довольно неравномерное, при магнитодвижущей силе катушки 375 А величина индукции лежит в диапазоне 10 – 50 мТл.

В результате проведенных опытов удалось установить, что описанный способ остается актуальным при наличии магнитного поля с индукцией 20 мТл.

На рис. 4 представлены индикаторные емкости с разной концентрацией ферромагнитных частиц в магнитной жидкости.

Чем больше концентрация ферромагнитных частиц в магнитной жидкости, тем отчетливее наблюдается непрозрачное пятно, и способ индикации оказывается более чувствительным даже в области слабых магнитных полей, индукция которых менее 50 мТл.

### Выводы

1. Актуальной задачей является создание метода входного контроля постоянных магнитов, состоящего из двух частей: предварительный экспресс-анализ намагниченности постоянных магнитов оптическим способом индикации магнитного поля; измерение магнитного поля постоянных магнитов с помощью измерительного прибора.

2. Предложен новый оптический способ индикации магнитного поля, позволяющий достаточно быстро и дешево, но с высокой степенью достоверности выявлять намагниченные и ненамагниченные постоянные магниты при входном контроле.

3. Предложенный способ остается актуальным при наличии магнитного поля с индукцией более 20 мТл.

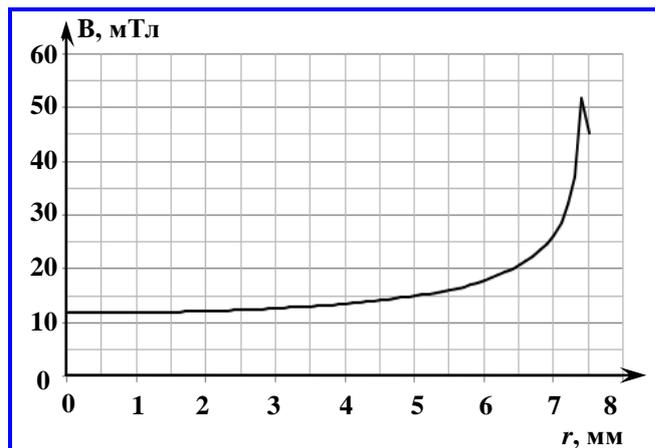


Рис. 3. График индукции на торцевой поверхности сердечника

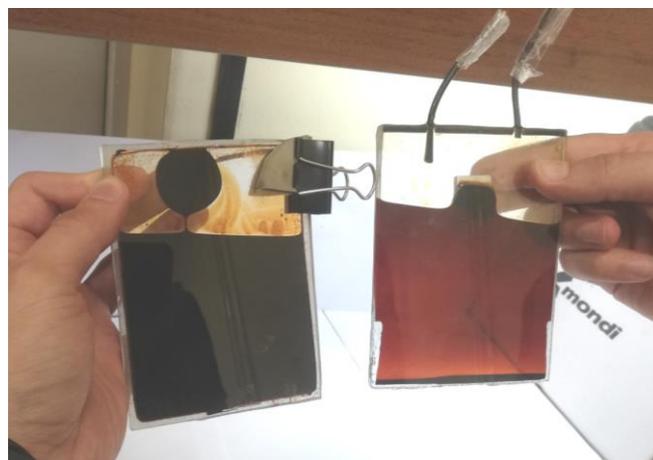


Рис. 4. Индикаторные емкости с разной концентрацией ферромагнитных частиц в магнитной жидкости

4. Рассмотрены индикаторные емкости с разной концентрацией ферромагнитных частиц в магнитной жидкости. Продемонстрировано, что при более высокой концентрации магнитной жидкости способ индикации является более чувствительным.

### Литература

1. Патент на полезную модель № 8261 U1 Российская Федерация, МПК А61N 2/00. Индикатор конфигурации магнитного поля : № 97111751/20 : заявл. 22.07.1997 : опубл.: 16.11.1998 / Рымарев В. Б. – 10 с.
2. Магнитная жидкость : [сайт]. – Москва, 1997 – 2020. – URL : магнитная-жидкость.рф.
3. Конструкция оснастки для измерения магнитной индукции постоянных магнитов при рабочей температуре / А. Б. Захаренко, С. А. Мартынова // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2014. – Т. 138. – № 1. – С. 3 – 6.
4. Способ измерения магнитной индукции для входного контроля постоянных магнитов с использованием имитатора магнитной системы электрической машины / А. Б. Захаренко, К. С. Осикова // Вопросы электромеха-

ники. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2019. – Т. 173. – № 6. – С. 3 – 6.

5. Применение способа измерения магнитной индукции для входного контроля магнитов, намагниченных по

схеме Хальбаха, с использованием имитатора магнитной системы / А. Б. Захаренко, К. С. Осикова // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2020. – Т. 176. – № 3. – С. 3 – 6.

Поступила в редакцию 02.08.2021

*Андрей Борисович Захаренко, начальник отдела общих научно-технических исследований, доктор технических наук, доцент, т. (495) 366-26-44, e-mail: otdel18@mcc.vniiem.ru.*

*Александр Каренович Надкин, научный сотрудник отдела общих научно-технических исследований, кандидат технических наук, т. (495) 366-54-24, e-mail: lab183@mcc.vniiem.ru.*

*Светлана Андреевна Мартынова, инженер отдела общих научно-технических исследований, аспирант, т. (495) 366-28-22, e-mail: lab181@mcc.vniiem.ru.*

*Семенов Владимир Тимофеевич, ведущий специалист отдела общих научно-технических исследований, т. (495) 366-19-69, e-mail: lab1811@mcc.vniiem.ru. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).*

## OPTICAL INDICATION OF MAGNETIC FIELD AT THE INCOMING INSPECTION OF PERMANENT MAGNETS

**A. B. Zakharenko, A. K. Nadkin,  
S. A. Martynova, V. T. Semenov**

*The requirements for the incoming inspection of permanent magnets are considered. The method of incoming inspection of permanent magnets meeting the requirements for speed, cheapness and high reliability is described. A device for optical indication of the magnetic field of permanent magnets is proposed in order to conduct a preliminary express analysis. The optical method of magnetic field indication is implemented using an indicator vessel filled with a magnetic liquid. To analyse the presence of the magnetic field of the inspected part, it is necessary to bring the part closer to the indicator vessel. In case of presence of the magnetic field of the inspected part, the magnetite particles will concentrate near the controlled part along the magnetic field lines. An experiment is performed to determine the sensitivity threshold of the magnetic field indicator. An electromagnet is considered as part of the experiment. By adjusting the current in the electromagnet winding, the minimum value of the intensity of the magnetic field is selected at which an opaque spot in the indicator vessel is observed. The described method is relevant in case of presence of a magnetic field with an induction of 20 mT.*

**Key words:** magnetic field indication, magnetic liquid, indicator vessel, sensitivity threshold, optical method of magnetic field indication.

### References

1. Utility model patent No. 8261 U1 Russian Federation, IPC A61N 2/00. Magnetic field configuration indicator: No. 97111751/20 : application of: 22.07.1997 : published on: 16.11.1998 / Rymarev V. B. – 10 p.
2. Magnetic liquid: [website]. – Moscow, 1997 – 2020. – URL : магнитная-жидкость.рф.
3. Design of equipment for measuring the magnetic induction of permanent magnets at operating temperature / A. B. Zakharenko, S. A. Martynova // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – Moscow : VNIIEEM Corporation JSC, 2014. – Vol. 138. – No. 1. – Pp. 3 – 6.
4. Method of measuring magnetic induction for the incoming inspection of permanent magnets using a simulator of the magnetic system of an electric machine / A. B. Zakharenko, K. S. Osikova // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – Moscow : VNIIEEM Corporation JSC, 2019. – Vol. 173. – No. 6. – Pp. 3 – 6.
5. Application of method of measuring magnetic induction for the incoming inspection of magnets magnetized according to the Halbach scheme using a magnetic system simulator / A. B. Zakharenko, K. S. Osikova // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – Moscow : VNIIEEM Corporation JSC, 2020. – Vol. 176. – No. 3. – Pp. 3 – 6.

*Andrei Borisovich Zakharenko, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of General Scientific and Technical Research, tel.: +7 (495) 366-26-44, e-mail: otdel18@mcc.vniiem.ru.*

*Aleksandr Karenovich Nadkin, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Researcher of Department of General Scientific and Technical Research, tel.: +7 (495) 366-54-24, e-mail: lab183@mcc.vniiem.ru.*

*Svetlana Andreevna Martynova, Ph. D. Student, Engineer of Department of General Scientific and Technical Research, tel.: +7 (495) 366-28-22, e-mail: lab181@mcc.vniiem.ru.*

*Vladimir Timofeevich Semenov, Leading Specialist of Department of General Scientific and Technical Research, tel.: +7 (495) 366-19-69, e-mail: lab1811@mcc.vniiem.ru. (JSC «Corporation VNIIEEM»).*