УДК 621.317.4

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТА НА ЕГО ВЕБЕР-АМПЕРНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ

Шайхутдинов Д.В., Горбатенко Н.И., Широков К.М., Дубров В.И., Ахмедов Ш.В., Леухин Р.И., Стеценко И.А.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, e-mail: iimt-srstu@mail.ru

В процессе приемо-сдаточных испытаний и эксплуатации электротехнических изделий необходимо контролировать соответствие их технических характеристик и параметров заданным. Важнейшим требованием проведения таких испытаний является получение измерительной информации без использования специальных сенсоров электромагнитных величин, расположенных внутри изделия. Перспективным направлением диагностики электротехнических изделий является анализ вебер-амперных характеристик их рабочих обмоток в процессе эксплуатации. В этой связи актуальной задачей является анализ вебер-амперных характеристик и установление их взаимосвязи с дефектами электротехнических изделий, в частности электромагнитов. В статье проведен анализ влияния наиболее распространенных дефектов электромагнитов броневого типа на изменение его вебер-амперной характеристики. С целью проверки полученных аналитических зависимостей проведены экспериментальные исследования. Результаты экспериментальных исследований подтверждают правильность теоретических исследований.

Ключевые слова: магнитные характеристики, электромагниты, измерение, приборы

ANALYSIS OF INFLUENCE OF CRITICAL MAGNETIC SYSTEM DEFECTS OF ELECTROMAGNET TO FLUX-CURRENT CHARACTERISTIC

Shaykhutdinov D.V., Gorbatenko N.I., Shirokov K.M., Dubrov V.I., Akhmedov S.V., Leukhin R.I., Stetsenko I.A.

Platov South-Russian State Polytechnical University (NPI), Novocherkassk, e-mail: iimt-srstu@mail.ru

During acceptance testing and using of electrical products their compliance with the specifications and specified parameters must be controlling. The most important requirement for such tests is to obtain the measurement data without using of special sensors of electromagnetic quantities, located inside the product. A perspective direction of diagnostics of electrical products is to analyze weber-amper characteristics of their working coil in the process of exploitation. In this regard, it is urgent to analyze the weber-amper characteristics and to establish their relationship with the defects of electrical products, in particular the electromagnets. The paper analyzes the impact of the most common types of defects electromagnets armor to change of its weber-amper characteristic. To confirm the obtained analytical dependences experiments is done, the results is represents.

Keywords: magnetic characteristics, electromagnets, measuring, instruments

Для выходного и промежуточного контроля электромагнитных устройств ранее были разработаны ряд методов [11–13, 17, 18] и устройств [2, 3, 6, 8, 9, 16]. В ходе проведенных работ были выявлены новые возможности диагностики неисправностей электромагнитных систем, основанные на анализе их вебер-амперных характеристик [7]. При этом контроль магнитных свойств изделий позволяет идентифицировать дефекты без необходимости проведения операций разборки/сборки механизмов. Однако наиболее информативные характеристики электромагнитов, к которым относятся вебер-амперные характеристики сложно получить с помощью известных сенсоров магнитных величин [5, 10], так как их «внедрение» в готовое устройство без нарушения его целостности в большинстве случаев невозможно. Таким образом, актуальной задачей является разработка бессенсорных методов технической диагностики наиболее распространенных неисправностей электромагнитных устройств.

Цель работы: разработка подходов к диагностике неисправностей электромагнитных механизмов на основании результатов измерения и последующего анализа их вебер-амперных характеристик.

Материал и методы исследований: элементы теории магнитного поля, методы теории планирования эксперимента, теории измерений, математического моделирования с использованием лицензированных пакетов прикладных программ *GMSH, Octave*.

Результаты исследований и их обсуждение

К наиболее распространенным неисправностям электромагнитных механизмов относятся:

– изменение геометрических параметров ферромагнитных элементов изделия

в течение его жизненного цикла, например появление сора внутри магнитной системы, приводящее к увеличению немагнитного зазора [14];

– появление межвитковых замыканий в намагничивающей обмотке устройства, приводящее к снижению ее электрического сопротивления и эффективного числа витков [15];

– загрязнение соприкасающихся рабочих поверхностей, повышающее коэффициент трения и препятствующее работе изделия при заданных параметрах электрических сигналов.

Рассмотрим магнитную систему (рис. 1), основными элементами которой являются: намагничивающая обмотка изделия с числом витков w, подключенная к источнику тока $i(t)$, два ферромагнитных элемента (сердечник и якорь электромагнита) с воздушным зазором между этими элементами. Для анализа влияния загрязнения соприкасающихся рабочих поверхностей сердечника и якоря электромагнита, повышающего коэффициент трения между ними, рассмотрим уравнение распределения сил, действующих на якорь электромагнита, и описывающее его движение:

$$F_{эмz} + m\frac{d^2z}{dt^2} - P + F_{эмx} \cdot k_{тр} \cdot \mathrm{sign}\frac{dz}{dt} = 0, \quad (1)$$

где $F_{эмz}$ – электромагнитная сила, действующая на якорь вдоль оси z; i – мгновенное значение тока в намагничивающих обмотках изделия, z – относительное положение якоря по оси z; m – масса якоря; P – сила тяжести, действующая на якорь, $P = mg$, g – ускорение свободного падения; $F_{эмx}$ – электромагнитная сила, действующая на якорь поперек оси z, вдоль оси x; $k_{тр}$ – коэффициент трения между соприкасающимися поверхностями якоря и сердечника; $\mathrm{sign}\frac{dz}{dt}$ – параметр, определяющий направление движения якоря, t – время.

Механическая сила в магнитном поле выражается в виде производной от энергии магнитного поля по координате z [1]:

$$F = \left|\partial W_M / \partial z\right| = \left|\partial(Li^2)/(2\partial z)\right|, \quad (2)$$

где $W_м$ – энергия магнитного поля; L – индуктивность катушки электромагнита; i – намагничивающий ток в обмотке электромагнита.

Энергия магнитного поля $W_м$ в зазоре длиной l_B равна

$$W_M = BHSl_В/2, \quad (3)$$

где B – магнитная индукция в зазоре; H – напряженность магнитного поля в зазоре; S – площадь поперечного сечения магнитопровода; $l_в$ – длина воздушного зазора.

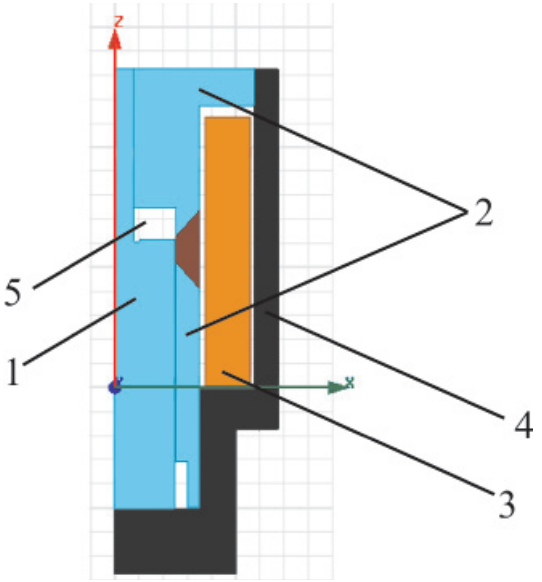

Рис. 1. Электромагнит. Двумерная осесимметричная модель:
1 – якорь; 2 – сердечник; 3 – намагничивающая катушка; 4 – корпус; 5 – воздушный зазор

Тогда сила, стремящаяся уменьшить воздушный зазор, определяемая производной по направлению, перпендикулярному плоскости воздушного зазора (по оси z), согласно (2) с учетом (3):

$$F = \frac{\partial W_M}{\partial l_B} = \frac{BH}{2}S = \frac{B^2}{2\mu_0}S, \quad (4)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Представим формулу (4), выразив магнитную индукцию B в воздушном зазоре через параметры электромагнита. Примем поперечное сечение магнитопровода постоянным. Используя закон полного тока для магнитопровода с воздушным зазором и допустив отсутствие полей рассеяния и однородность магнитной индукции B в сечении S магнитопровода, получим

$$Hl + H_B l_B = iw,$$

где $H = B/\mu\mu_0$ и $H_B = B/\mu_0$ – напряженность магнитного поля в магнитопроводе и в воздушном зазоре соответственно; w – число витков катушки электромагнита; l – длина средней линии магнитопровода; μ – магнитная проницаемость материала магнитопровода.

Следовательно,

$$B = \frac{\mu_0 iw}{(l/\mu + l_B)}. \quad (5)$$

Подставив выражение магнитной индукции B (5) в формулу (4), получим выра-

жение для силы, действующей вдоль оси z и стремящейся уменьшить воздушный зазор l_B, в виде

$$F_{эмz} = \frac{\mu_0(\mu i w)^2 S}{2(l + \mu\, l_B)^2}. \quad (6)$$

Если якорь размещен по отношению к отверстию ярма концентрично, то из-за симметрии такого расположения суммарная радиальная сила, действующая на якорь поперек оси z, вдоль оси x (рис. 1), равна нулю [4]. Однако в большинстве случаев условие концентрического расположения не выполняется и якорь располагается эксцентрично относительно ярма. В этом случае на якорь действует радиальная сила одностороннего притяжения. Данная сила в соответствии с [4] имеет вид

$$F_{эмx} = 4,06 \cdot 10^{-8} \cdot B^2 \frac{\pi d^2}{4} \frac{d\varepsilon}{4h_\varepsilon \sqrt{e^2 - \varepsilon^2}}, \quad (7)$$

где d – диаметр якоря; ε – величина смещения якоря от центра; e – половина воздушного зазора между поверхностями трения якоря и ярма; h_ε – высота вхождения якоря в ярмо.

Подставляя (5) в (7), с учетом того, что в данном случае необходимо рассматривать в качестве воздушного зазора величину e, получим

$$F_{эмx} = 4,06 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{\mu_0 i w}{(l/\mu + e)} \right)^2 \frac{\pi d^2}{4} \frac{d\varepsilon}{4h_\varepsilon \sqrt{e^2 - \varepsilon^2}}. \quad (8)$$

С учетом (6) и (8) выражение (1) примет вид

$$\frac{\mu_0(\mu i w)^2 S}{2(l + \mu l_B)^2} + m\frac{d^2 z}{dt^2} - mg + 4,06 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{\mu_0 i w}{(l/\mu + e)} \right)^2 \frac{\pi d^2}{4} \frac{d\varepsilon}{4h_\varepsilon \sqrt{e^2 - \varepsilon^2}} \cdot k_{тр} \cdot \operatorname{sign}\frac{dz}{dt} = 0. \quad (9)$$

Рассмотрим стационарное состояние магнитной системы электромагнита, при котором $e = \text{const}$, $\varepsilon = \text{const}$, $d = \text{const}$, $w = \text{const}$, $h_\varepsilon = \text{const}$, $\mu = \text{const}$, $S = \text{const}$, $l_в = \text{const}$. Тогда правомерным для дальнейших расчетов будут обозначения

$$b_1 = \frac{\mu_0(\mu w)^2 S}{2(l + \mu\, l_B)^2};$$

$$b_2 = 4,06 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{\mu_0 w}{(l/\mu + e)} \right)^2 \frac{\pi d^2}{4} \frac{d\varepsilon}{4h_\varepsilon \sqrt{e^2 - \varepsilon^2}}.$$

При этом выражение (9) примет вид

$$b_1 i^2 + m\frac{d^2 z}{dt^2} - mg + b_2 \cdot i^2 \cdot k_{тр} \cdot \operatorname{sign}\frac{dz}{dt} = 0. \quad (10)$$

Для движения якоря электромагнита необходимо выполнение условия

$$m\frac{d^2 z}{dt^2} \geq 0.$$

Кроме того, в этом случае

$$\operatorname{sign}\frac{dz}{dt} = -1.$$

Получим

$$0 \leq m\frac{d^2 z}{dt^2} = -b_1 i^2 + mg + b_2 \cdot i^2 \cdot k_{тр}$$

или

$$b_1 i^2 - mg - b_2 \cdot i^2 \cdot k_{тр} \leq 0.$$

Решим данное неравенство относительно коэффициента трения $k_{тр}$:

$$k_{тр} \geq \frac{b_1}{b_2} - \frac{mg}{b_2 i^2}. \quad (11)$$

Решим данное неравенство относительно тока в намагничивающих обмотках i:

$$i \geq \sqrt{\frac{mg}{b_1 - b_2 k_{тр}}}. \quad (12)$$

Вебер-амперная характеристика изделия является зависимостью вида $\psi(i)$, где $\psi = \Phi \cdot w$ – потокосцепление обмотки числом витков w с магнитным потоком Φ в последовательной магнитной цепи сердечника и якоря электромагнита. При этом магнитный поток определяется как свойствами материалов ферромагнитных элементов, так и размерами воздушного зазора (рис. 1). Основываясь на полученной зависимости (12), делаем вывод, что при увеличении коэффициента трения $k_{тр}$, например при засорении или окислении соприкасающихся поверхностей электромагнитной системы, значение тока, необходимое для обеспечения движения якоря, растет. Причем данная зависимость является нелинейной. На основании данного вывода и основываясь на выражении (11), получаем: возрастание тока i_k, необходимого для достижения некоторого значения магнитного потока $\Phi_k(i_k)$, при прочих равных условиях исследования

является признаком наличия дополнительных противодействующих сил, в частности силы трения. На основе данного вывода предложен алгоритм технической диагностики наличия засорения в электромагнитных устройствах путем анализа их вебер-амперных характеристик, заключающийся в следующем:

1. Производится измерение вебер-амперной характеристики в виде $\psi_j(i_{гj})$ годного электромагнитного устройства ($j = 1, 2, ..., m$, где m – число точек на вебер-амперной характеристике).

2. Производится измерение вебер-амперной характеристики $\psi_j(i_{дj})$ диагностируемого электромагнитного устройства.

3. Сравнивают полученные характеристики. В случае, если выполняется условие $i_{гj}(\psi_j) << i_{дj}(\psi_j)$, делается вывод о засорении электромагнита.

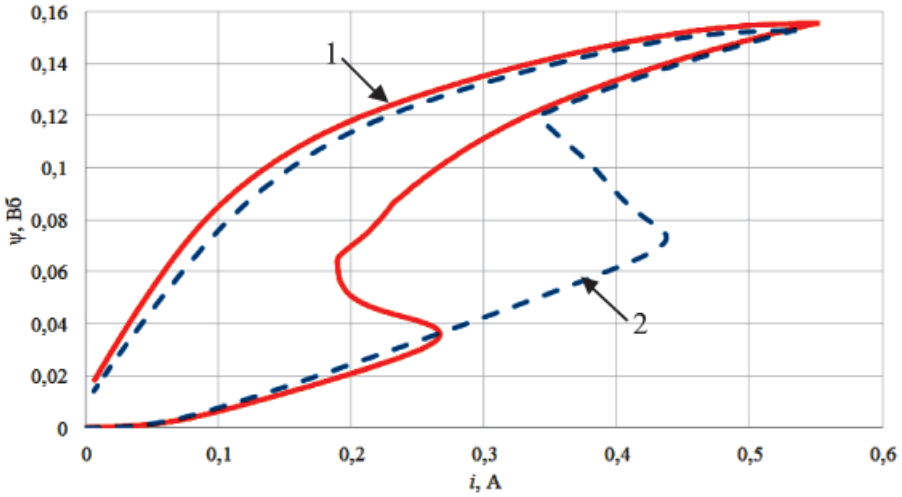

Рис. 2. Вебер-амперные характеристики электромагнита:
1 – без дополнительной противодействующей силы; 2 – с дополнительной силой, препятствующей движению якоря

Предложенный алгоритм опробован на результатах измерений устройства [16]. Результаты экспериментальных исследований подтвердили правильность теоретических выводов. На рис. 2 приведены измеренные вебер-амперные характеристики одного и того же электромагнита, причем для получения второго графика электромагнит был нагружен дополнительным противодействующим усилием в виде возвратной пружины, моделирующей увеличение коэффициента трения $k_{тр}$.

Результаты работы получены в рамках выполнения показателей по стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики в период с 2012 по 2014 гг., номер гранта СП-748.2012.1 и в период с 2013 по 2014 гг., номер гранта СП-1967.2013.1. Работы выполнены в СНИЛ «ИИС» ЮРГПУ(НПИ). Работы выполнены с использованием оборудования ЦКП «Диагностика и энергоэффективное электрооборудование» ЮРГПУ(НПИ).

Список литературы

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. – М.: Высш. шк., 1986. – С. 126–127.

2. Горбатенко Н.И., Ланкин М.В., Наракидзе Н.Д., Шайхутдинов Д.В., Тришечкин Д.В. Устройство для испытания изделий из ферромагнитных материалов // Патент России на изобретение № 2357265.2009. Бюл. № 15.

3. Горбатенко Н.И., Ланкин М.В., Шайхутдинов Д.В., Широков К.М. Устройство для измерения характеристик магнитомягких материалов // Патент России на изобретение № 2390789.2010. Бюл. № 15.

4. Гордон А.В. Электромагниты постоянного тока / А.В. Гордон, А.Г. Сливинская. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 447 с.

5. Ланкин М.В., Горбатенко Н.И., Гречихин В.В., Савин Д.Д., Ланкина Г.В., Ткаченко Е.Г. Устройство для измерения напряженности магнитного поля // Патент России на изобретение № 2155968.2004. Бюл. № 13.

6. Ланкин М.В., Горбатенко Н.И., Гришин А.С., Пжилуский А.А. Устройство для классификации ферромагнитных материалов по форме кривой намагничивания // Патент России на изобретение № 2185635.2004. Бюл. № 16.

7. Сахавова А.А., Широков К.М., Январев С.Г. Применение метода косвенного определения вебер-амперных характеристик в автоматизированной системе бессенсорной диагностики электромагнитных механизмов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5; URL: www.science-education.ru/111-10234 (дата обращения: 04.10.2013).

8. Шайхутдинов Д.В. Устройство для экспресс-испытаний изделий из листовой стали // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 6(156). – С. 55–61.

9. Шайхутдинов Д.В., Горбатенко Н.И., Ахмедов Ш.В., Шайхутдинова М.В. Датчик и прибор для измерения магнитных параметров листовой электротехнической стали // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 4. – URL: www.science-education.ru/110-9756.

10. Шайхутдинов Д.В., Горбатенко Н.И., Наракидзе Н.Д., Леухин Р.И., Широков К.М., Дубров В.И., Стеценко И.А., Ахмедов Ш.В. Измерительный преобразователь напряженности магнитного поля для прибора экспресс-испытаний изделий из листовой электротехнической стали // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5; URL: http://www.science-education.ru/119-14895 (дата обращения: 14.10.2014).

11. Шайхутдинов Д.В., Гречихин В.В., Боровой В.В. Методы и приборы экспресс-контроля магнитных параметров для промышленных систем управления // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – URL: http://education.ru/106-7516 (дата обращения: 16.05.2014).

12. Шайхутдинов Д.В., Ланкин М.В., Боровой В.В. Измерение магнитных характеристик элементов мехатронных систем в режиме последовательного резонанса // Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2009. – Спец. выпуск: Мехатроника. Современное состояние и тенденции развития.– С. 177–179.

13. Шайхутдинов Д.В., Шайхутдинова М.В. Метод определения магнитных свойств электротехнической стали // Международный журнал экспериментального образования. – 2013. – № 11–1. – С. 105–107.

14. Шайхутдинов Д.В., Январев С.Г., Широков К.М., Ахмедов Ш.В. Метод технической диагностики нарушений геометрических параметров магнитной системы электромагнитных устройств на базе их вебер-амперных характеристик // Международный журнал экспериментального образования. – 2014. – № 8 (Ч.1). – С. 84–86.

15. Шайхутдинов Д.В., Январев С.Г., Широков К.М., Леухин Р.И. Метод технической диагностики межвитковых замыканий в электромагнитных устройствах на базе их вебер-амперных характеристик // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 8. – С. 69–71.

16. Широков К.М., Шайхутдинов Д.В., Дубров В.И., Январёв С.Г., Ахмедов Ш.В., Шайхутдинова М.В. Устройство магнитного контроля для подсистемы управления производством электротехнических изделий // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6; URL: www.science-education.ru/113-11665 (дата обращения: 16.05.2014).

17. Широков К.М., Гречихин В.В. Исследование бессенсорных устройств определения магнитных характеристик для систем управления производством электромагнитов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6. – С. 1173–1178.

18. Shaykhutdinov D.V., Gorbatentko N.I., Akhmedov Sh.V., Shaykhutdinova M.V., Shirokov K.M. Experimental and Simulation Tests of Magnetic Characteristics of Electrical Sheet Steel // Life Science Journal. – 2013. – № 10(4); URL:http://www.lifesciencesite.com/lsj/life1004/361_22173life1004_2698_2702.pdf.

References

1. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovi elektrotekhniki. Elektromagnitnoe pole. M.: Visshaja shkola, 1986. pp. 126–127.

2. Gorbatenko N.I., Lankin M.V., Narakidze N.D., Shaykhutdinov D.V., Trischechkin D.V. Ustrojstvo dlia ispitanija izdelij iz ferremagnitnih materialov // Patent Rossii no. 2357265.2009. Bul. no. 15.

3. Gorbatenko N.I., Lankin M.V., Shaykhutdinov D.V., Shirokov K.M. Ustrojstvo dlia izmerenia harakteristik magnitomjagkih materialov // Patent Rossii no. 2390789.2010. Bul. no. 15.

4. Gordon A.V. Elektromagniti postojannogo toka / A.V. Gordon, A.G. Slivinskaja. M.: Gosenergoizdat, 1960. 447 p.

5. Lankin M.V., Gorbatenko N.I., Grechikhin V.V., Savvin D.D., Lankina G.V., Tkachenko E.V. Ustrojstvo dlia izmerenija napriagennosti magnitnogo polia // Patent Rossii no. 2155968.2004. Bul. no. 13.

6. Lankin M.V., Gorbatenko N.I., Grishin A.S., Pgilusskij A.A. Ustrojstvo dlia klassifikacii ferromagnitnih materialov po forme krivoj namagnichivania // Patent Rossii no. 2185635.2004. Bul. no. 16.

7. Sakhavova A.A., Shirokov K.M., Yanvarev S.G. Primenenie metoda kosvennogo opredelenija veber-ampernyh harakteristik v avtomatizirovannoj sisteme bessensornoj diagnostiki jelektromagnitnyh mehanizmov // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija, 2013, no. 5; URL: www.science-education.ru/111-10234.

8. Shaykhutdinov D.V. Ustrojstvo dlia ekspress-ispitanij izdelij iz listovoj stali // Kontrol'. Diagnostika. 2011. no. 6(156). pp. 55–61.

9. Shaykhutdinov D.V., Gorbatenko N.I., Akhmedov Sh.V., Shaykhutdinova M.V. Datchik i pribor dlia izmerenija magnitnih parametrov listovoj elektrotehnicheskoj stali // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija, 2013. no. 4. URL: www.science-education.ru/110-9756.

10. Shaykhutdinov D.V., Gorbatenko N.I., Narakidze N.D., Leukhin R.I., Shirokov K.M., Dubrov V.I., Stetsenko I.A., Akhmedov Sh.V. Izmeritel'nij preobrazovatel napriagennosti magnitnogo polia dlia pribora ekspress-ispitanij izdelij iz listovoj elektrotehnicheskoj stali // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija, 2014. no. 5; URL: http://www.science-education.ru/119-14895.

11. Shaykhutdinov D.V., Grechikhin V.V., Borovoy V.V. Metodi i probori ekpress-kontrolia magnitnih parametrov dlia promishlennih sistem upravlenija // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija, 2012. no. 6. – URL: http://education.ru/106-7516.

12. Shaykhutdinov D.V., Lankin M.V., Borovoy V.V. Izmerenie magnitnih harakteristik elementov mehatronnih sistem v regime posledovatel'nogo rezonansa // Izvestija vuzov. Sev.-Kavk. region. Tekhn. nauki. 2009. Spec. vipusk: Mekhatronika. Sovremennoe sostojanie i tendencii razvitija. pp. 177–179.

13. Shaykhutdinov D.V., Shaykhutdinova M.V. Metod opredelenija magnitnih svojastv elektrotekhnicheskoj stali // Megdunarodnij jurnal eksperimentalnogo obrazovanija, 2013. no. 11–1. pp. 105–107.

14. Shaykhutdinov D.V., Yanvarev S.G., Shirokov K.M., Akhmedov Sh.V. Metod tehnicheskoj diagnostiki narushenij geometricheskih parametrov magnitnoj sistemi elekromagnitnih ustroistv na base ih veber-ampernih harakteristik // Megdunarodnij jurnal eksperimentalnogo obrazovanija, 2014. no. 8 (P.1). pp. 84–86.

15. Shaykhutdinov D.V., Yanvarev S.G., Shirokov K.M., Leukhin R.I. Metod tehnicheskoj diagnostiki megvitkovih zamikanij v elektromagnitnih ustrojstvah na base ih veber-ampernih harakteristik // Sovremennie naukojemkie tehnologii, 2014. no. 8. pp. 69–71.

16. Shirokov K.M., Shaykhutdinov D.V., Dubrov V.I., Yanvarev S.G., Akhmedov Sh.V., Shaykhutdinova M.V. Ustrojstvo magnitnogo kontrolia dlia podsistemi upravlenija proizvodstvom elektrotehnicheskih izdelij // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija, 2013. no. 6; URL: www.science-education.ru/113-11665.

17. Shirokov K.M., Grechikhin V.V. Issledovanie bessensornih ustrojstv opredelenija magnitnih harakteristik dlia sistem upravlenija proizvodstvom elekromagnitov // Fudamentalnie issledovanija, 2014. no. 6. pp. 1173–1178.

18. Shaykhutdinov D.V., Gorbatentko N.I., Akhmedov Sh.V., Shaykhutdinova M.V., Shirokov K.M. Experimental and Simulation Tests of Magnetic Characteristics of Electrical Sheet Steel // Life Science Journal. 2013. no. 10(4); URL:http://www.lifesciencesite.com/lsj/life1004/361_22173life1004_2698_2702.pdf.

Рецензенты:

Гречихин В.В., д.т.н., профессор кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии», ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск;

Кириевский Е.В., д.т.н., профессор кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии», ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск.

Работа поступила в редакцию 28.11.2014.