

5. Polyakov D.A., Nikitin K.I., Tereshchenko N.A., Novosolov A.S., Bilevich Ya.P. Issledovanie chastichnykh razryadov v opornykh izolyatorakh [Investigation of partial discharges in support insulators]. Omskii nauchnyi vestnik [Omsk scientific bulletin], 2020, No. 1 (169), pp. 32–38.
6. Poluyanovich N.K., Dubyago M.N. Analiz kharakteristik i issledovanie teplovogo proboya izolyatsionnykh materialov, vyzvannykh chastymi razryadami [Analysis of characteristics and investigation of thermal breakdown of insulating materials caused by partial discharges]. Nauchnyi vestnik NGTU [Scientific Herald of Nizhny Novgorod State Technical University], 2018, Vol. 71, No. 2, pp. 157–174.
7. Kupershtokh A.L., Karpov D.I. “Relay-race” mechanism of partial discharges in a long chain of cavities for stochastic nature of process. Journal of electrostatics, 2018, Vol. 94, pp. 8–13.
8. Zhuang T., Ren M., Xie J., Zhang C., Duan R., Dong M. Slow current induced by partial discharge in kapton, epoxy and pet. IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation, 2019, Vol. 26, No. 3, pp. 955–963.
9. Korobeinikov S.M., Ridel A.V., Karpov D.I., Ovsyannikov A.G., Meredova M.B. Mechanism of Partial Discharges in Free Helium Bubbles in Transformer Oil. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, Vol. 26, No. 5, pp. 1605–1611.
10. Korobeinikov S.M., Ovsyannikov A.G., Ridel A.V., Karpov D.I., Lyutikova M.N., Kuznetsova Yu.A., Yassinskii V.B. Study of partial discharges in liquids. Journal of Electrostatics, 2020, No. 103. 1034120304-3886/© 2019 Elsevier B.V.
11. Ovsyannikov A.G., Korobeinikov S.M., Vagin D.V. Svyaz' kazhushchegosya i istinnogo zaryadov chastichnykh razryadov [The relationship of the apparent and true charges of partial discharges]. Elektrichestvo [Electricity], 2014, No. 8, pp. 37–43.
12. Korobeinikov S.M., Ridel A.V., Medvedev D.A., Karpov D.I., Ovsyannikov A.G., Meredova M.B. Registration and simulation of partial discharges in free bubbles at AC voltage. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, Vol. 26, Iss. 4, pp. 1035–1042.
13. Kinsht N.V., Petrun'ko N.N. Ob otsenke parametrov chastichnykh razryadov [On the estimation of the parameters of partial discharges]. Elektrichestvo [Electricity], 2016, No. 6, pp. 51–56.
14. Kutsenko S.M., Klimov N.N. Diagnostics of high-voltage insulation of the railway transport overhead system by the method of spaced antennas. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 760, International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans-2019) 12–15 November 2019, Moscow, Russian Federation.
15. Kovrigin L.A. Modelirovanie chastichnykh razryadov v izolyatsii kabelei srednego napryazheniya [Modeling of partial discharges in the insulation of medium-voltage cables]. Elektrotehnika [Electrical engineering], 2013, No. 11, pp. 49–51.
16. Ovsyannikov A.G., Korobeinikov S.M., Vagin D.V. Apparent and True Charges of Partial Discharges. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, Vol. 24, No. 6, pp. 3687–3693.
17. Kupershtokh A.L., Stamatelatos S.P., Agoris D.P. Modelirovanie chastichnykh razryadov v tverdykh dielektrikakh na peremennom napryazhenii [Modeling of partial discharges in solid dielectrics with alternating voltage]. Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki [Letters in the journal of technical physics], 2006, Vol. 32, Iss. 15, pp. 74–81.
18. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P. Kontseptsiya intellektual'noi sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya [The concept of an intelligent traction power supply system]. Innovatsionnyi transport [Innovative transport], 2015, No. 1(15), pp. 59–65.

Информация об авторах

Куценко Сергей Михайлович – к. т. н., доцент кафедры автоматизации, телемеханики и связи, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kutsenko_s@irgups.ru

Климов Николай Николаевич – д. ф.-м. н., профессор кафедры автоматизации, телемеханики и связи, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: klinn42@mail.ru

Information about the authors

Sergei M. Kutsenko – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Automation, Telemechanics and Communication, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kutsenko_s@irgups.ru

Nikolai N. Klimov – Doctor of Physics and Mathematics, Professor of the Department of Automation, Telemechanics and Communication, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: klinn42@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2020.2(66).42-52

УДК 620.179

Способ определения и оценки дефектов и внутренних напряжений в протяженных стальных изделиях с симметричными поперечными сечениями

М. А. Степанов, А. П. Степанов✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ Stepanov_AP@irgups.ru

Резюме

В статье описывается способ определения и оценки дефектов и внутренних напряжений в протяженных стальных изделиях с симметричными поперечными сечениями, представляющими собой большой класс объектов в промышленности и на транспорте. Суть способа сводится к созданию симметричного внешнего магнитного поля

относительно оси (осей) симметрии геометрической фигуры поперечного сечения изделия, изготовленного из однородного ферромагнитного материала, и к анализу симметрии созданного таким образом магнитного поля. Неоднородности в материале поперечного сечения делают неоднородным сопротивление несинусоидальному току участков площади сечения, что ведет к искажению исходной формы кривой тока в таком сечении. Для контроля нарушения симметрии внешнего магнитного поля поперечных сечений устанавливаются датчики, измеряющие индукцию в характерных попарно симметричных точках на поверхности поперечного сечения относительно оси (осей) симметрии геометрической фигуры поперечного сечения. При этом показания попарно симметричных датчиков поперечного сечения будут отличаться при обнаружении дефектов, структурных изменений или внутренних напряжений в поперечном сечении как при стационарных измерениях, так и при движении датчиков поперечного сечения вдоль контролируемого изделия. В качестве примера приводятся картины моделирования магнитных полей поперечных сечений рельса, а также результаты эксперимента с образцом рельса с дефектом, извлеченного из действующего полотна электрифицированной железной дороги. В результате эксперимента определяются и оцениваются дефект и внутренние локальные напряжения в образце рельса на основе измерения магнитной индукции в попарно симметричных точках на поверхности поперечных сечений на контролируемом участке образца рельса. Первоначально образец был намагничен несинусоидальным тяговым током, затем постоянным магнитом в целях создания симметричного магнитного поля относительно геометрической фигуры поперечного сечения образца. В первом и втором случаях определяются сечения с дефектом и локальными внутренними напряжениями.

Ключевые слова

неразрушающий магнитный контроль, намагничивающий несинусоидальный ток, протяженный ферромагнитный профиль, симметричные поперечные сечения, определение дефектов, внутренние напряжения

Для цитирования

Степанов М.А. Способ определения и оценки дефектов и внутренних напряжений в протяженных стальных изделиях с симметричными поперечными сечениями / М.А. Степанов, А.П. Степанов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – Т. 66 № 2. – С. 42–52. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.2(66).42-52

Информация о статье

поступила в редакцию: 04.03.2020, поступила после рецензирования: 26.03.2020, принята к публикации: 12.04.2020

A method for determining and evaluating defects and internal stresses in extended steel products with symmetrical cross-sections

M. A. Stepanov, A. P. Stepanov✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ Stepanov_AP@irgups.ru

Abstract

The paper describes a method for determining and evaluating defects and internal stresses in extended steel products with symmetrical cross-sections, which are a large class of objects in industry and transport. The essence of the method is to create a symmetrical external magnetic field relative to the axis (axes) of symmetry of the geometric shape of the cross-section of the product made of a homogeneous ferromagnetic material, and to analyze the symmetry of the magnetic field created in this way. In this case, the magnetizing non-sinusoidal current must have a constant component when decomposing into a Fourier series. Then, the external magnetic field formed by the DC component and the current harmonics of the low frequencies will carry information about the central layers of the cross section and external magnetic field generated by the higher harmonic current, will be more to carry information about the surface layers of the cross-section, complementing the information obtained from the DC component and low frequency currents. Heterogeneity in the cross-sectional material makes the resistance of sections of cross sectional area to non-sinusoidal current non-uniform. This leads to a distortion of the source current waveform in this section. To control the symmetry breaking of the external magnetic field of cross-sections, sensors are installed that measure the induction at characteristic pairwise symmetrical points on the cross-section surface relative to the symmetry axis (axes) of the cross-section geometric figure. At the same time, the readings of pairwise symmetric cross-section sensors will differ when defects, structural changes or internal stresses are detected in the cross-section, both during stationary measurements and when the cross-section sensors move along the monitored product. As an example, we present a simulation of magnetic fields of cross-sections of a rail, as well as the results of an experiment with a sample of a rail with a defect extracted from the operating trackbed of an electrified railway. As a result of the experiment, the defect and internal local stresses in the rail sample are determined and evaluated based on the measurement of magnetic induction at pairwise symmetrical points on the surface of cross-sections on the monitored section of the rail sample. Initially, the sample was magnetized by non-sinusoidal traction current, then by a permanent magnet in order to create a symmetrical magnetic field relative to the geometric shape of the cross-section of the sample. In the first and second cases, sections with a defect and local internal stresses are determined.

Keywords

non-destructive magnetic testing, non-sinusoidal current magnetization, extended ferromagnetic profiles, symmetrical cross-sections, detection and evaluation of defects, internal stresses

For citation

Stepanov M.A., Stepanov A.P. Sposob opredeleniya i otsenki defektov i vnutrennikh napryazhenii v protyazhennykh stal'nykh izdeliyakh s simmetrichnymi poperechnymi secheniyami [A method for determining and evaluating defects and internal stresses in extended steel products with symmetrical cross-sections]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Tech-nologies. System Analysis. Modeling], 2020, Vol. 66, No. 2, pp. 42–52. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.2(66).42-52

Article info

Received: 04.03.2020, Revised: 26.03.2020, Accepted: 12.04.2020

Введение

В промышленности и на транспорте существует большой класс протяженных стальных объектов, требующих постоянного контроля, оценки возникающих в них при эксплуатации дефектов и внутренних напряжений. Контроль и диагностика протяженных элементов на действующих объектах вызывает большие трудности [1–10]. Элементы протяженных объектов в большинстве случаев изготовлены из профилей, произведенных из однородного ферромагнитного материала, имеющих в поперечном сечении геометрическую фигуру, симметричную относительно одной или более осей симметрии. К таким объектам относятся железнодорожные линии электрифицированных железных дорог. При эксплуатации они находятся в напряженном состоянии, и по ним протекает тяговый (сетевой) ток от электровозов. При этом фигура поперечного сечения рельсов симметрична относительно вертикальной оси симметрии [1].

Разработанные способы магнитного контроля имеют ряд недостатков, связанных с контролем протяженных объектов, а также с небольшой глубиной проникновения высокочастотного намагничивающего поля в материал изделия [3–11]. Для таких объектов были разработаны новые способы магнитного контроля, суть которых сводится к созданию постоянного симметричного магнитного поля относительно геометрической фигуры поперечного сечения профиля на участке контроля и к дальнейшему анализу картин внешнего магнитного поля поперечных сечений профиля [12–15]. Отметим, что в разработанных способах не применяется переменное магнитное поле, которое при одновременном намагничивании изделия с постоянным магнитным полем может улучшить достоверность и качество контроля как по глубине изделия, так и в его поверхностных слоях [7–11]. В последнее время предлагаются новые способы магнитного контроля ферромагнитных профилей, имеющих в поперечном сечении простую геометрическую фигуру, симметричную относительно одной или нескольких осей симметрии. К таким способам магнитного контроля дефектов, структурных изменений и локальных напряжений на контролируемом участке протяжен-

ного профиля можно отнести способы, предложенные в некоторых работах [12–16]. Рассмотрим более подробно один из них [16].

Постановка задачи

Разберем способ магнитного контроля, предложенный в патенте [16], позволяющий контролировать глубинные и поверхностные слои протяженных стальных изделий с симметричными поперечными сечениями. Рассмотрим, как работает этот способ контроля на примере магнитного контроля образца рельса железнодорожного полотна электрифицированной железной дороги, по которому во время эксплуатации протекал тяговый ток.

Решение задачи

В патенте задача магнитного контроля протяженного изделия заключается в намагничивании изделия путем пропускания вдоль его длины переменного несинусоидального тока с постоянной составляющей, который создает требуемое симметричное внешнее магнитное поле относительно оси (осей) симметрии геометрической фигуры поперечного сечения изделия [16]. Для априори однородного материала изделия в каждом поперечном сечении в попарно симметричных точках на поверхности изделия при отсутствии дефектов, структурных изменений и (или) локальных напряжений магнитная индукция в любой момент времени будет одинаковой, при этом, если датчики напряжения, установленные в этих же точках поперечного сечения, будут двигаться относительно длины изделия, то их показания также будут равны друг другу [12–18].

Далее показаны попарно симметричные характерные точки поперечного сечения рельса, в которых можно измерять магнитную индукцию и напряжения в датчиках напряжения (рис. 1). Выбор характерных попарно симметричных точек зависит от их доступности, значимости в обнаружении дефектов в данных местах сечений изделия, а также от других факторов. Выбор формы и силы намагничивающего несинусоидального тока, если это не определено условиями эксплуатации, для каждого конкретного изделия происходит опытным путём.

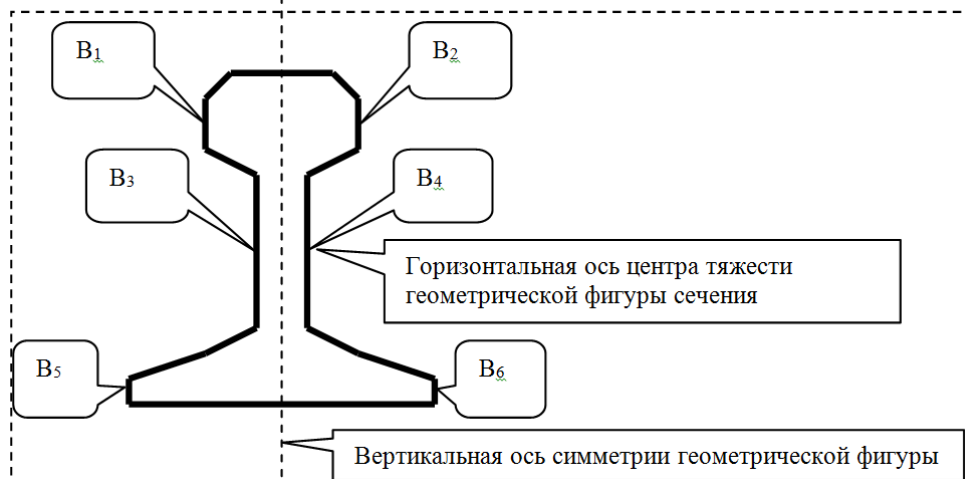


Рис. 1. Геометрическая фигура поперечного сечения рельса и магнитная индукция в характерных попарно симметричных точках:

B₁ и B₂ – головки рельса, B₃ и B₄ – шейки рельса, B₅ и B₆ – подошвы рельса

Fig. 1. The geometric figure of the rail cross-section and magnetic induction at characteristic pairwise symmetric points: B₁ and B₂ – rail tops, B₃ and B₄ – rail webs, B₅ and B₆ – rail bases

При возникновении в однородном материале поперечного сечения изделия дефектов, структурных изменений и (или) изгибных напряжений, картина внешнего магнитного поля поперечного сечения будет несимметричной. Магнитная индукция и электрическое напряжение в датчиках будут не равными друг другу по величине в любой момент времени (рис. 2).

Показаны картины магнитного поля поперечного сечения рельса при отсутствии дефектов (рис. 2, а) и наличии дефекта (рис. 2, б) в поперечном сечении рельса при пропускании по рельсу постоянного тока плотностью $j = 10\,000\text{ A/m}^2$, полученные путем моделирования в среде «Maxvel». Сравнение картин магнитного поля дает представление о характере изменения магнитной индукции в попарно симмет-

ричных точках.

Несинусоидальный ток, текущий вдоль изделия, неравномерно распределяется по площади поперечного сечения изделия. Действительно, если кривую тока представить в виде ряда Фурье с постоянной составляющей, то высшие гармоники тока будут преобладать в поверхностных слоях поперечного сечения [10, 11, 17].

Таким образом, внешнее магнитное поле, образованное постоянной составляющей тока и гармониками тока низких частот, будет нести информацию о центральных слоях поперечного сечения, а внешнее магнитное поле, создаваемое высшими гармониками тока, будет больше нести информацию о поверхностных слоях поперечного сечения, дополняя ин-

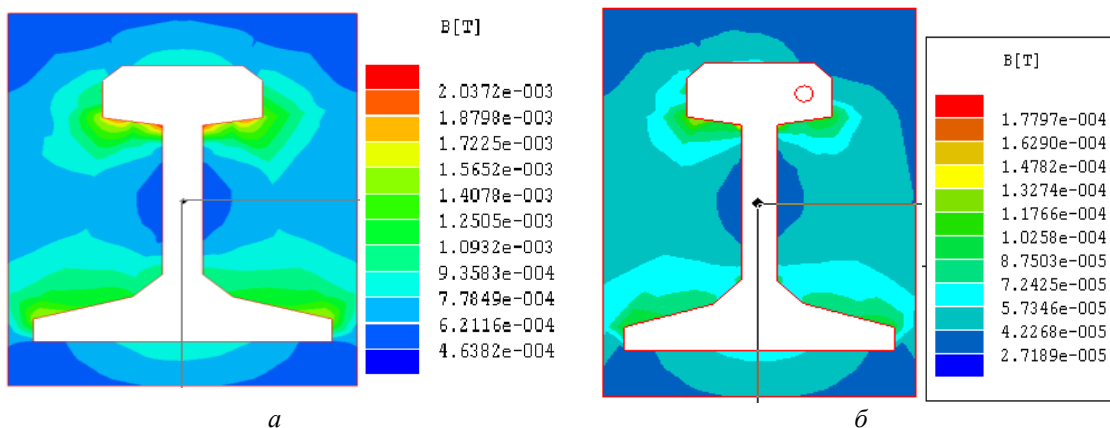


Рис. 2. Картины внешнего магнитного поля сечения рельса при пропускании по рельсу постоянного тока плотностью $j = 10\,000\text{ A/m}^2$:

а – без дефекта; б – с дефектом

Fig. 2. Pictures of the external magnetic field of the rail section when passing a direct current of density $j = 10,000\text{ A/m}^2$ on the rail:

а – without a defect; б – with a defect

формацию, получаемую от постоянной составляющей тока и токов низких частот. Отметим также, что неоднородности в материале поперечного сечения делают неоднородным сопротивление участков площади сечения, что ведет к искажению исходной формы кривой тока в таком сечении [17].

Отсюда следует, что измерение магнитной индукции и электрического напряжения в характерных попарно симметричных точках поперечного сечения с последующим разложением их в ряд Фурье дает спектры, характеризующие состояние поперечного сечения изделия. Сравнивая между собой в попарно симметричных точках магнитную индукцию и напряжение, включая их амплитудные значения для одних и тех же гармоник, находится соответствующая разность, которая будет давать информацию о наличии дефектов, структурных изменений и внутренних напряжений в контролируемом сечении. Распределение указанной разности по гармоникам характеризует найденную аномалию в данном сечении. Появление новых гармоник в спектрах сигналов магнитной индукции и напряжений по сравнению с основными гармониками намагничивающего несинусоидального тока говорит о значительных структурных изменениях в контролируемом сечении.

Идентификация дефектов, структурных изменений и внутренних напряжений в контролируемом

сечении изделия проводится по указанным выше признакам, а также путем сравнения с данными других сечений на контролируемом участке изделия.

В октябре 2019 г. проводился эксперимент с образцом рельса Р65 с дефектом в головке рельса в виде небольшой трещины (дефект 21.1) [1], ранее выявленный с помощью дефектоскопа УДС2-РДМ-2 вне стыка на действующем участке электрифицированной железной дороги, и вырезанный из полотна в апреле 2019 г.

Ниже приведены типичные формы несинусоидальных кривых сетевого напряжения и тока участка железной дороги, с которого был вырезан исследуемый дефектный отрезок рельса (рис. 3). Таким образом, участок рельса с дефектом был намагничен несинусоидальным током.

Образец был разбит на 22 поперечных сечения через 2 см каждое так, чтобы дефект оказался примерно в середине контролируемого участка. Измерения остаточной магнитной индукции, полученной от намагничивания тяговым током, проводились в шести попарно симметричных точках каждого сечения контролируемого участка (см. рис. 1).

Согласно анализу построенных кривых распределения магнитной индукции по поперечным сечениям образца следует, что магнитная индукция в головке рельса B_1 и B_2 (рис. 4) и разность их моду-

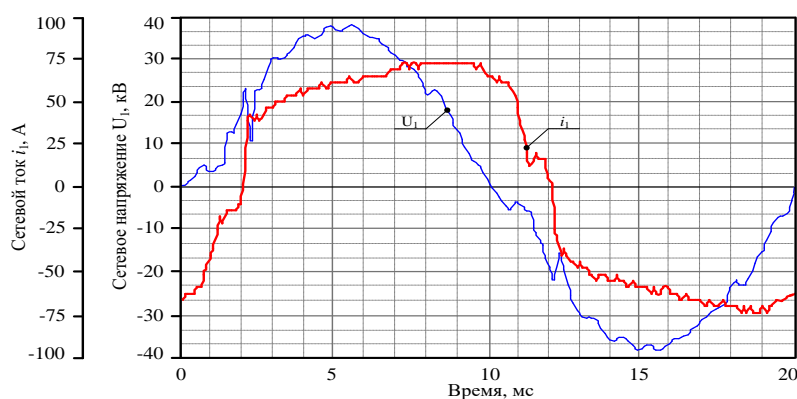


Рис. 3. Несинусоидальные кривые тока I и напряжения U

Fig. 3. Nonsinusoidal curves of current I and voltage U

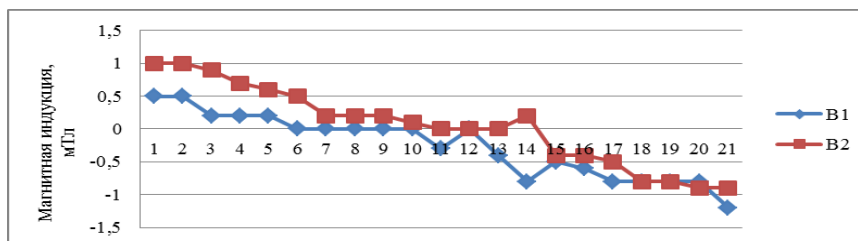


Рис. 4. Распределение магнитной индукции на участке контроля в характерных точках B_1 и B_2 на поверхности головки рельса после намагничивания тяговым током
Fig. 4. The distribution of magnetic induction in the control area at characteristic points B_1 and B_2 on the surface of the rail top after magnetization by traction current

лей $\Delta B_{12} = |B_1| - |B_2|$ (рис. 5), а также индукция в подошве рельса B_5 и B_6 (рис. 6) и разность их модулей $\Delta B_{56} = |B_5| - |B_6|$ (рис. 7) в попарно симметричных точках меняют знак на прямо противоположный в поперечных сечениях с дефектами в районе 10 сечения головки рельса (рис. 4, 5), и в районе 13–15 сечений подошвы рельса (рис. 6, 7).

Из анализа кривых магнитной индукции B_3 и B_4 (рис. 8) и разности их модулей $\Delta B_{34} = |B_3| - |B_4|$ (рис. 9) следует, что магнитная индукция в шейке рельса на горизонтальной оси центра тяжести фигуры поперечного сечения рельса практически остается постоянной в районе нулевых значений.

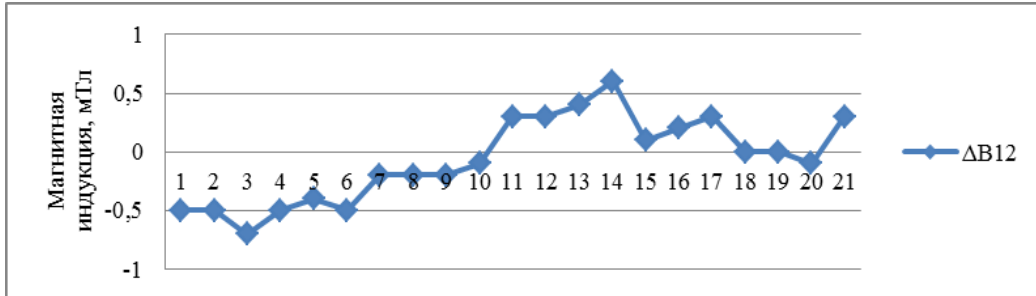


Рис. 5. Распределение разности модулей магнитной индукции $\Delta B_{12} = |B_1| - |B_2|$ на участке контроля в характерных точках B_1 и B_2 на поверхности головки рельса после намагничивания тяговым током

Fig. 5. The distribution of the difference of the modules of the magnetic induction $\Delta B_{12} = |B_1| - |B_2|$ on the inspection site at characteristic points B_1 and B_2 on the surface of the rail top after magnetization by traction current

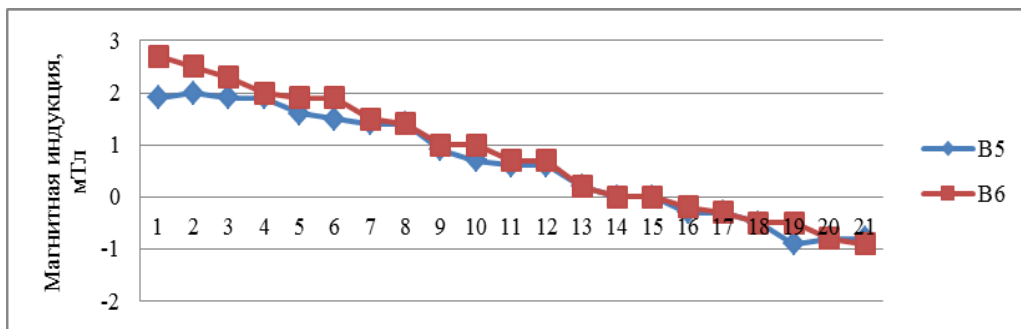


Рис. 6. Распределение магнитной индукции на участке контроля в характерных точках B_5 и B_6 на поверхности подошвы рельса после намагничивания тяговым током

Fig. 6. The distribution of magnetic induction in the control area at characteristic points B_5 and B_6 on the surface of the rail base after magnetization by traction current

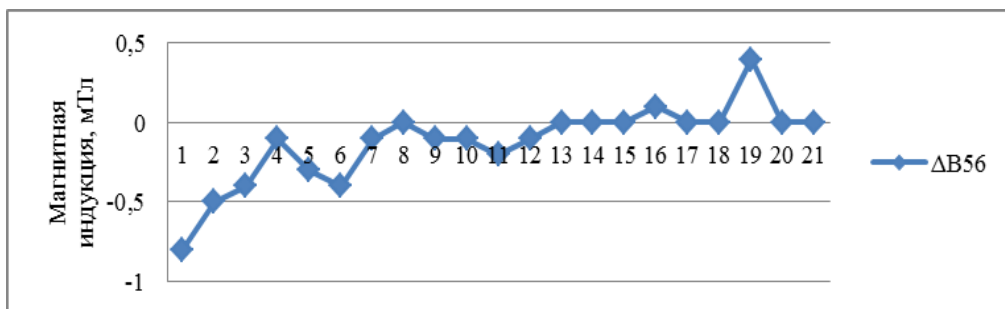


Рис. 7. Распределение разности модулей магнитной индукции $\Delta B_{56} = |B_5| - |B_6|$ на участке контроля в 21-м сечении в характерных точках B_5 и B_6 на поверхности подошвы рельса после намагничивания тяговым током

Fig. 7. The distribution of the difference of the magnetic induction modules $\Delta B_{56} = |B_5| - |B_6|$ on the control section in the 21st section at characteristic points B_5 and B_6 on the surface of the rail base after magnetization by traction current

До и после образования трещины в головке рельса произошли существенные изменения в напряженном состоянии на контролируемом участке образца рельса. Из анализа кривых распределения разностей модулей магнитной индукции в попарно симметричных точках в сечениях головки рельса ΔB_{12} (см. рис. 5) и подошвы рельса ΔB_{56} (см. рис. 7) следует, что слева и справа от дефекта на контролируемом участке нарушается симметрия магнитного поля в указанных сечениях ($|B_1| \neq |B_2|$ и $|B_5| \neq |B_6|$), т. е. присутствуют остаточные внутренние напряжения в поперечных сечениях образца рельса. Далее на противоположных концах контролируемого участка магнитная индукция по величине в головке $|B_1|$, $|B_2|$, а также подошве $|B_5|$, $|B_6|$ рельса значительно различается (см. рис. 4, 6).

В дальнейшем было проведено намагничивание контролируемого участка образца постоянным поперечным магнитным полем в целях создания симметричного магнитного поля относительно вертикальной оси симметрии геометрической фигуры поперечного сечения рельса. После намагничивания остаточное магнитное поле будет результирующим, так как получается в результате наложения двух магнитных полей: остаточного магнитного поля, ранее полученного от переменного несинусоидального тягового тока, и остаточного магнитного поля, полученного от постоянного магнита. В остаточном результирующем магнитном поле на контролируе-

мом участке образца основную роль будет играть магнитное поле, полученное от постоянного магнита, как более сильное по сравнению с магнитным полем, полученным от тягового тока, т. е. при таком намагничивании больше получим информацию о глубинных слоях материала поперечных сечений образца на контролируемом участке.

Проведены измерения магнитной индукции в характерных точках поперечных сечений (см. рис. 1), и сделан анализ кривых распределения магнитной индукции на участке контроля, позволяющих оценить состояние глубинных слоев материала образца рельса на контролируемом участке (рис. 10–14). Показана общая картина распределения магнитной индукции в 6 характерных точках по всем сечениям на участке контроля (рис. 10). Магнитная индукция B_3 и B_4 в попарно симметричных точках в шейке рельса на горизонтальной оси центра тяжести фигуры поперечного сечения рельса остается практически постоянной в районе нулевых значений. Сделаем детальный анализ остальных кривых распределения магнитной индукции. Кривые распределения магнитной индукции B_1 и B_2 (рис. 11) и кривая разности их модулей $\Delta B_{12} = |B_1| - |B_2|$ (рис. 12) в 1 и 2 характерных точках головки рельса говорят о том, что в 9, 10 и 11 сечениях наблюдается значительная несимметрия магнитного поля, связанная с дефектом (трещиной) в головке рельса. При этом дефект локализуется между этими сечениями. Слева и

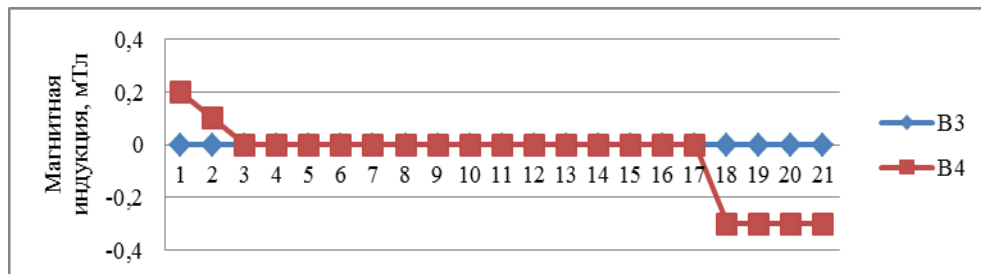


Рис. 8. Распределение магнитной индукции на участке контроля в характерных точках B_3 и B_4 на поверхности шейки рельса после намагничивания тяговым током
Fig. 8. The distribution of magnetic induction in the control area at characteristic points B_3 and B_4 on the surface of the rail web after magnetization by traction current

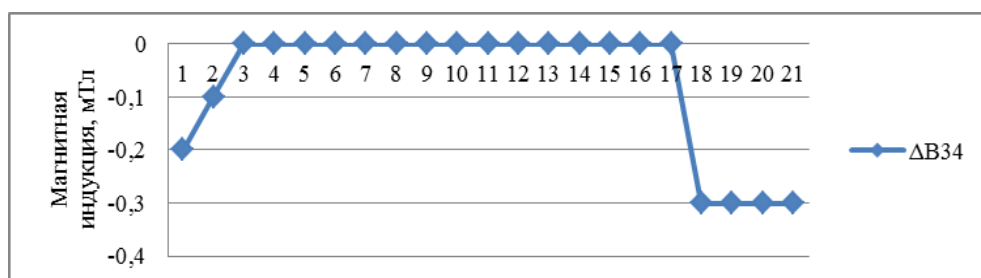


Рис. 9. Распределение разности модулей магнитной индукции $\Delta B_{34} = |B_3| - |B_4|$ на участке контроля в характерных точках B_3 и B_4 на поверхности шейки рельса после намагничивания тяговым током
Fig. 9. The distribution of the difference of the modules of the magnetic $\Delta B_{34} = |B_3| - |B_4|$ in the control area at characteristic points B_3 and B_4 on the surface of the rail web after magnetization by traction current

справа от сечений с дефектом (9–11) наблюдаются резкие изменения в симметрии магнитного поля, вызванные внутренними локальными напряжениями

в головке рельса.

Внутренние локальные напряжения и структурные изменения в металле в подошве рельса на кон-

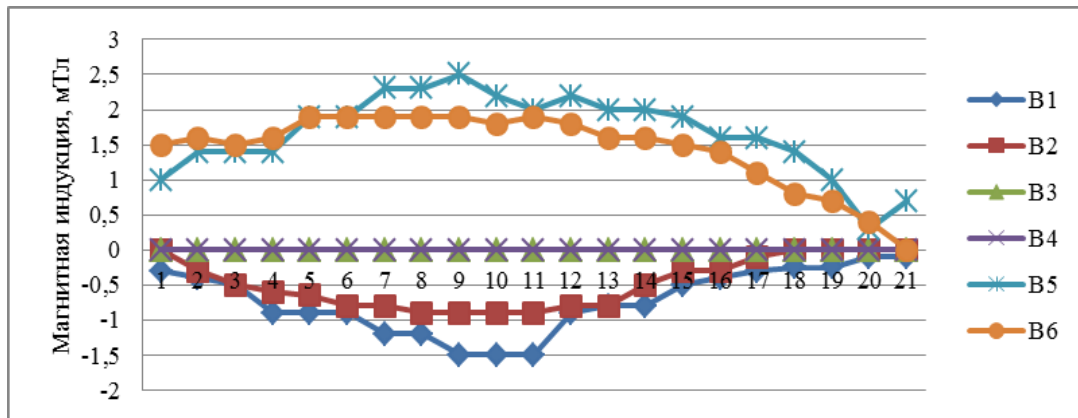


Рис. 10. Распределение магнитной индукции на участке в 6 характерных точках (B_1 – B_6) на поверхности рельса после намагничивания внешним поперечным магнитным полем
Fig. 10. Distribution of magnetic induction in the area at 6 characteristic points (B_1 – B_6) on the rail surface after magnetization by an external transverse magnetic field

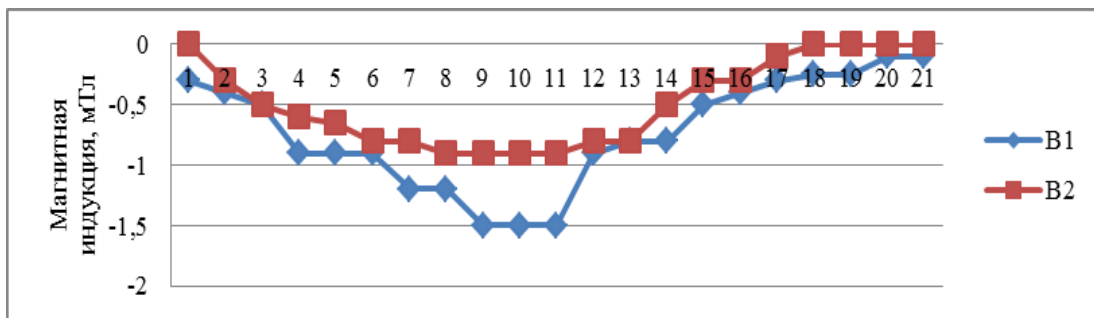


Рис. 11. Распределение магнитной индукции на участке контроля в характерных точках B_1 и B_2 на поверхности головки рельса после намагничивания внешним поперечным магнитным полем
Fig. 11. The distribution of magnetic induction in the control area at characteristic points B_1 and B_2 on the surface of the rail top after magnetization by an external transverse magnetic field

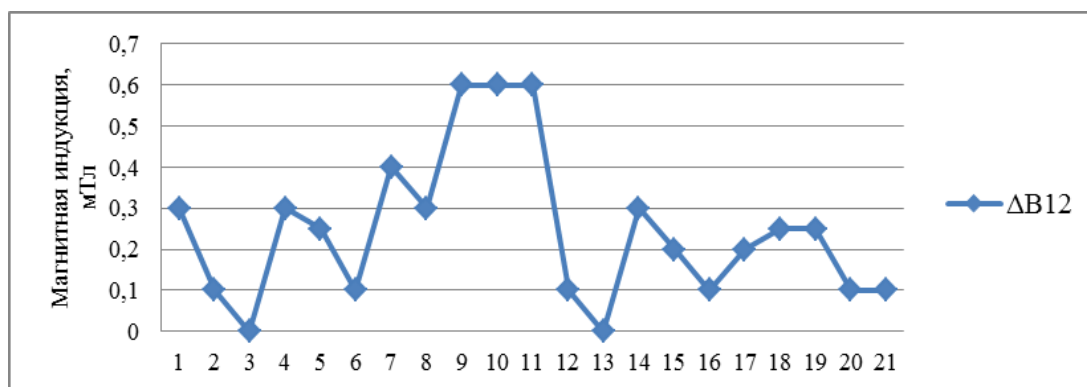


Рис. 12. Распределение разности модулей $\Delta B_{12} = |B_1| - |B_2|$ магнитной индукции на участке контроля в характерных точках B_1 и B_2 на поверхности головки рельса после намагничивания внешним поперечным магнитным полем
Fig. 12. The distribution of the difference of the modules $\Delta B_{12} = |B_1| - |B_2|$ magnetic induction in the control area at characteristic points B_1 and B_2 on the surface of the rail top after magnetization by an external transverse magnetic field

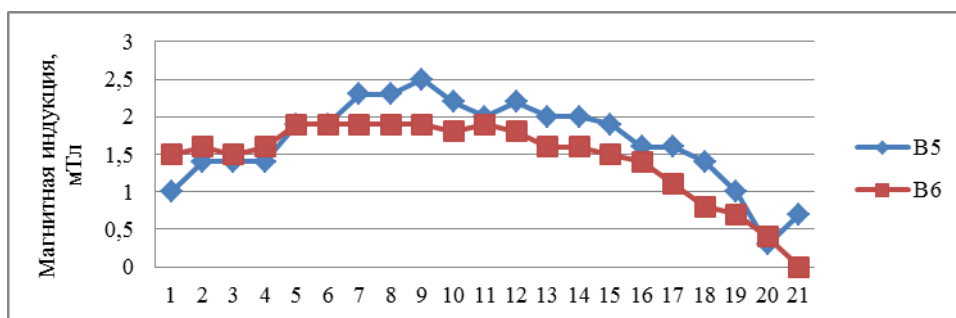


Рис. 13. Распределение магнитной индукции на участке контроля в характерных точках B_5 и B_6 на поверхности шейки рельса после намагничивания внешним поперечным магнитным полем

Fig. 13. The distribution of magnetic induction in the control area at characteristic points B_5 and B_6 on the surface of the rail web after magnetization by an external transverse magnetic field

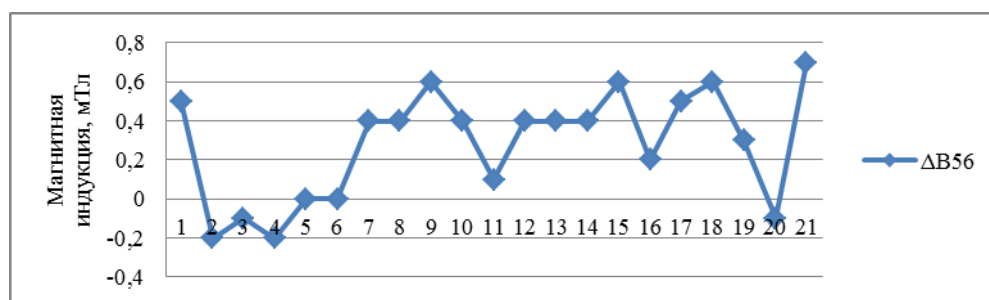


Рис. 14. Распределение разности модулей $\Delta B_{56} = |B_5| - |B_6|$ магнитной индукции на участке контроля в характерных точках B_5 и B_6 на поверхности шейки рельса после намагничивания внешним поперечным магнитным полем

Fig. 14. The distribution of the difference of the modules $\Delta B_{56} = |B_5| - |B_6|$ magnetic induction in the control area at characteristic points B_5 and B_6 on the surface of the rail web after magnetization by an external transverse magnetic field

тролируемом участке значительно исказили симметрию магнитного поля поперечных сечений с 7 по 18 сечения (рис. 13, 14).

Выводы

Способ магнитного контроля протяженных стальных изделий с симметричным поперечным сечением, предложенный в патенте [17], дает возможность оперативного выполнения процесса магнитного контроля во время эксплуатации и вне его

электрифицированных участков железных дорог с помощью мобильных технических средств.

Совместное использование несинусоидального тока и постоянного магнитного поля для создания симметричного магнитного поля в симметричных поперечных сечениях протяженных стальных изделий позволяет определять места дефектов, структурных изменений и локальных напряжений в априори однородном по составу материале.

Список литературы

1. Шур Е.А. Повреждения рельсов. М.: Интекс, 2012. 192 с.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: в 8 т. Т. 4: в 3 кн. / под общ. ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2006. 3 т.
3. Неразрушающий контроль: Справочник в 8 т. Т. 6: в 3 кн. / под общ. ред. В.В. Клюева. 2-е изд. испр. М.: Машиностроение, 2006. 848 с. 3 т.
4. Бозорт Р. Ферромагнетизм. М.: Иностранная литература, 1956. 784 с.
5. Кифер И.И., Пантюшин В.С. Испытания ферромагнитных материалов. М.: Госэнергоиздат, 1955. 240 с.
6. Вонсовский С.В., Шур Я.С. Ферромагнетизм. М.; Л.: ОГИЗ; ГИТТЛ, 1948. 816 с.
7. Ворошилов В.П., Дунаев Ф.Н., Зверева В.И. О влиянии упругих напряжений на магнитострикцию ферромагнетиков // Изв. Вузов СССР. Физика. 1969. № 2. С. 89.
8. Каганов М.И., В.М. Цукерник Природа магнетизма. М.: Наука, 1982. 192 с.
9. Безлюдько Г.Я., Волохов С.А., Соломаха Р.Н. Изменение магнитного состояния металла стальной конструкции при механических воздействиях // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2006. № 3. С. 42.
10. Горбаш В.Г., Делендик М.Н., Павленко П.Н. Неразрушающий контроль в промышленности. Магнитный контроль // Неразрушающий контроль и диагностика. 2011. № 2. С. 48-63.

11. Федосенко Ю.К. Шкатов П.Н., Ефимов А.Г. Вихретоковый контроль. 2-е изд. М.: Спектр, 2014. 224 с.
12. Пат. № 2387983 Рос. Федерация, RU 2 387 983 C1, МПК G01N 27/82 (2006.01). Способ магнитной дефектоскопии / А.П. Степанов, М.А. Степанов, А.И. Милованов и др.; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщ. № 2008143039/28; заявл. 29.10.2008; опубл. 27.04.2010, Бюл. № 12. 5 с.
13. Пат. № 2441227 Российская Федерация, RU 2 441 227 C1, МПК G01N 27/72 (2006.1). Способ магнитной дефектоскопии изделий в напряженном состоянии / Степанов А.П., Милованов А.И., Степанов М.А.; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщен. – № 2010121417/28, заявл. 26.05.2010, опубл. 27.01.2012, Бюл. № 3. 3 с.
14. Пат. № 2452943 Рос. Федерация, RU 2 452 943 C1, МПК G01N 27/82 (2006.1). Способ обнаружения изгибных напряжений / А.П. Степанов, М.А. Степанов, А.И. Милованов и др.; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщ. № 2010142042/28; заявл. 13.10.2010; опубл. 10.06.2012, Бюл. № 16. 5 с.
15. Пат. № 2521753 Рос. Федерация, RU 2 521 753 C1, МПК G01N 27/82 (2006.1). Способ оперативного обнаружения дефектов и механических напряжений в протяженных конструкциях / Степанов М.А., Степанов А.П., Пыхалов А.А.; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщ. № 2013100328/28; заявл. 09.01.2013; опубл. 10.07.2014, Бюл. № 19. 5 с.
16. Пат. № 2680669 Рос. Федерация, RU 2 680 669 C1, МПК G01N 27/72 (2006.1). Способ магнитного контроля протяженных изделий с симметричным поперечным сечением / Степанов А.П., Степанов М.А., Степанов Е.М.; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщ. № 2018112518; заявл. 06.04.2018; опубл. 25.02.2019, Бюл. № 6. 7 с.
17. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке и др. М.: Энергоатомиздат, 1989. 528 с.
18. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле. М.: Высшая школа, 1978. 231 с.

References

1. Shur E.A. Povrezhdeniya rel'sov [Rail damage]. Moscow: Inteks Publ., 2012, 192 p.
2. Klyuev V.V. (gen. ed.) Nerazrushayushchii kontrol': Spravochnik: V 8 t. [Non-destructive testing: A reference book: In 8 vols.]. Vol. 4: in 3 books. Book 1. Anisimov V.A., Katorgin B.I., Kutsenko A.N., etc. Acoustic strain measurement. Book 2. Shelikhov G.S. Magnetic particle control method. Book 3. Filinov M.V. Capillary control]. 2nd ed., ISPR. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2006, 736 p.: II.
3. Klyuev V.V. (gen. ed.) Nerazrushayushchii kontrol': Spravochnik: V 8 t. [Non-destructive testing: A reference book: In 8 vols.]. Vol. 6: in 3 books. Book 1. Klyuev V.V., Muzhitskii V.F., Gorkunov E.S., Shcherbinin V.E. Magnetic methods of control. Book 2. Filinov V.N., Ketkovich A.A., Filinov M.V. Optical control. Book 3. Matveev V.I. Radio wave control]. 2nd ed. ISPR. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2006, 848 p.: II.
4. Bozort R. Ferromagnetizm [Ferromagnetism]. Moscow: Foreign literature Publ., 1956, 784 p.
5. Kiefer I.I., Pantyushin V.S. Ispytaniya ferromagnitnykh materialov [Tests of ferromagnetic materials]. Moscow: Gosenergoizdat Publ., 1955. 240 p.
6. Vonsovskii S.V. Shur Ya. S. Ferromagnetizm [Ferromagnetism]. Moscow; Leningrad: OGIZ Publ., The state publishing house of technical and theoretical literature, 1948, 816 p.
7. Voroshilov V.P., Dunaev F.N., Zvereva V.I. O vliyaniy uprugikh napryazhenii na magnitostrikttsiyu ferromagnetikov [On the influence of elastic stresses on the magnetostriction of ferromagnets]. Izv. Vuzov SSSR. Fizika. [News of the universities of the USSR. Physics], 1969, No. 2, pp. 89.
8. Kaganov M.I., Zukernik V.M. Priroda magnetizma [The nature of magnetism]. Moscow: Nauka Publ., 1982, 192 p.
9. Bezlyudko G.Ya., Volokhov S.A., Solomakha R.N. Izmenenie magnitnogo sostoyaniya metalla stal'noi konstruktssii pri mekhanicheskikh vozdeistviyakh [Change of the magnetic state of the metal of the steel structure under mechanical impacts]. Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchii kontrol' [Technical diagnostics and non-destructive testing], 2006, No. 3, pp. 42.
10. Gorbash V.G., Delendik M.N., Pavlenko P.N. Nerazrushayushchii kontrol' v promyshlennosti. Magnitnyi kontrol' [Non-destructive testing in industry. Magnetic control]. Nerazrushayushchii kontrol' i diagnostika [Non-destructive testing and diagnostics], 2011, No. 2, pp.
11. Fedosenko Yu.K., Shkatov P.N., Efimov A.G. Vkhretokovyy kontrol': ucheb. posob. [Eddy current control: a textbook]. In Klyuev V.V. (gen. ed.) 2nd ed. Moscow: Spectrum Publ., 2014, 224 p.: ill.
12. Stepanov A.P., Stepanov M.A., Milovanov A.I., Salomatov V.N., Lopatin M.V. Sposob magnitnoi defektoskopii [A method of magnetic defectoscopy]. Pat. No. 2387983 Russian Federation, RU 2 387 983 C1, IPC G01N 27/82 (2006.01); applicant and patent holder is Irkutsk State Transport University, No. 2008143039/28, appl. Oct 29, 2008, publ. Apr 27, 2010, bull. No. 12, 5 p.: II.
13. Stepanov A.P., Milovanov A.I., Stepanov M.A. Sposob magnitnoi defektoskopii izdelii v napryazhennom sostoyanii [Method of magnetic defectoscopy of products in a stressed state]; Pat. No. 2441227 Russian Federation, RU 2 441 227 C1, IPC G01N 27/72 (2006.1). Applicant and patent holder is Irkutsk State Transport University, No. 2010121417/28, appl. May 26, 2010, publ. Jan 27, 2012, bull. No. 3, 3 p.
14. Stepanov A.P., Stepanov M.A., Milovanov A.I., Salomatov V.N. Sposob obnaruzheniya izgibnykh napryazhenii [Method for detecting flexural stresses]; Pat. No. 2452943 Russian Federation, RU 2 452 943 C1, IPC G01N 27/82 (2006.1). Applicant and patent holder is Irkutsk State Transport University, No. 2010142042/28, appl. 13.10.2010, publ. Jun 10, 2012, bull. No. 16 – 5 p.
15. Stepanov M.A., Stepanov A.P., Pykhalov A.A. Sposob operativnogo obnaruzheniya defektov i mekhanicheskikh napryazhenii v protyazhennykh konstruktssiyakh [Method of operational detection of defects and mechanical stresses in extended structures]. Pat. No. 2521753 Russian Federation, RU 2 521 753 C1, IPC G01N 27/82 (2006.1); Applicant and patent holder is Irkutsk State Transport University, No. 2013100328/28, appl. Jan 09, 2013, publ. Jul 10, 2014, bull. No. 19, 5 p.
16. Stepanov A.P., Stepanov M.A., Stepanov E.M. Sposob magnitnogo kontrolya protyazhennykh izdelii s simmetrichnym poperechnym secheniem [A method of magnetic control of extended products with a symmetrical cross-section]; Pat. No.

2680669 Russian Federation, RU 2 680 669 C1, IPC G01N 27/72 (2006.1). Applicant and patent holder is Irkutsk State University, No. 2018112518, appl. Apr 06, 2018, publ. Feb 25, 2019, bull. No. 6 – 7 p.

17. Zeveke G.V. et al. *Osnovy teorii tsepei* [Fundamentals of circuit theory]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1989, 528 p.

18. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki: Elektromagnitnoe pole* [Theoretical foundations of electrical engineering: Electromagnetic field]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1978, 231 p.

Информация об авторах

Степанов Максим Александрович – к. т. н., доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: Stepanov_MA@irgups.ru

Степанов Александр Петрович – к. т. н., доцент, профессор кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: Stepanov_AP@irgups.ru

Information about the authors

Maksim A. Stepanov – Ph.D. in Engineering Science, Professor of the Subdepartment of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: Stepanov_MA@irgups.ru

Aleksandr P. Stepanov – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Subdepartment of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: Stepanov_AP@irgups.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2020.2(66).52-60

УДК 62-523.6

Методология автоматизированного исследования воздействия высокочастотной электротермии на разнополярные полимеры, используемые в транспортном машиностроении

Н. Г. Филиппенко ✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ Pentagon@mail.ru

Резюме

В работе на основе обобщенных данных анализируются ранее созданные автоматизированные системы научных исследований высокочастотной электротермии и обосновывается новый принцип построения автоматизированных систем научного исследования, позволяющий решать задачи определения параметров теплообмена, электрофизических параметров и фазовых превращений в полимерных и композитных материалах при воздействии на них высокочастотного поля в реальном режиме времени. В разработанной методологии исключается характерная для стандартных методов определения характеристик и параметров полимеров и композитов необходимость сбора и обработки большого объема данных, не порождается суммирующаяся погрешность измерения, а исходные значения параметров при измерениях защищены от возмущающих воздействий. Построена методология нового (универсального) класса автоматизированных систем научных исследований высокочастотной электротермии. На основе разработанного и интегрированного в нее «банка знаний» и алгоритма его использования у исследователей появляется возможность оперативно определять направление построения как универсальных, так и узкоспециальных систем исследований в различных областях процессов воздействий высокочастотного поля на полимерные и композитные материалы. Разработанная автором методология нового (универсального) класса автоматизированных систем научных исследований высокочастотной электротермии, основанная на совокупности элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, позволила построить архитектуру «банка знаний», обеспечивающую возможность их абстракции, что в свою очередь позволяет не только пользоваться «банком знаний», но и оперативно поддерживать его независимость и вести базу различным группам пользователей. Предложенная автором методология помогает определить путь исследователя в области его изысканий по тематике электротермического воздействий высокочастотного поля на полимерные и композитные материалы.

Ключевые слова

системы автоматизированных научных исследований, высокочастотная электротермия, полимерные изделия, методология построения систем исследований

Для цитирования

Филиппенко Н.Г. Методология автоматизированного исследования воздействия высокочастотной электротермии на разнополярные полимеры, используемые в транспортном машиностроении // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – Т. 66 № 2. – С. 52–. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.2(66).52-

Информация о статье

поступила в редакцию: 19.02.2020, поступила после рецензирования: 24.03.2020, принята к публикации: 10.04.2020

A methodology of automated research of the impact of high-frequency Electrothermy on heteropolar polymers used in transport engineering