

УДК 621.317.39 (075.8)

К. К. Ким, Е. С. Мушков, И. А. Нестерцов, И. С. Полунин, Д. А. Саенко

НЕРАЗРУШАЮЩАЯ ДИАГНОСТИКА СТЕПЕНИ РЖАВОСТИ ЖЕЛЕЗНОЙ АРМАТУРЫ ОПОРЫ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Дата поступления: 29.06.2015

Решение о публикации: 16.09.2015

Цель: Доказать, что можно повысить точность диагностирования степени ржавости железной арматуры опор с помощью электрических дефектоскопов в различных сферах деятельности: в технике, промышленности, на транспорте и т. д. **Методы:** Применялись расчёты плоскопараллельного электростатического поля в специализированной программе ELCUT, проводились экспериментальные исследования. **Результаты:** Описана экспериментальная установка, а также принцип действия дефектоскопа, основанного на различии в значениях диэлектрической проницаемости ржавого и чистого «здорового» железа. Установлено, что добавление дополнительных пластин приводит к «выпрямлению» эквипотенциальных линий на краях рабочих электродов на ~ 7,8%. **Практическая значимость:** Установлено, что данный дефектоскоп может быть использован для неразрушающего контроля состояния степени ржавости железной арматуры железобетонных шпал, железобетонных конструкций стрелочных переводов, железобетонных опор и др.

Арматура, ржавчина, контактная сеть, электрокоррозия, неразрушающая диагностика, силовые линии, электростатическое поле, дефектоскоп.

Konstantin K. Kim, D. Eng., professor, department chairman, kimkk@inbox.ru; **Yevgeniy S. Mushkov**, student, asphodel@mail.ru; **Ivan A. Nestertsov**, student; **Igor S. Polunin**, student, polunin.ig@gmail.com; **Dmitriy A. Sayenko**, student (Petersburg State Transport University) NON-DESTRUCTIVE RUST GRADE DIAGNOSTICS OF REINFORCEMENT METAL IN CONTACT-LINE STRUCTURES

Objective: To prove that it is possible to increase accuracy of rust grade diagnostics of reinforcement metal in structures using electric-powered fault detectors in various spheres of activity, engineering, industry, transport and so forth. **Methods:** Calculations of plane-parallel electrostatic field were conducted in the specialised ELCUT program, and experimental studies were conducted. **Results:** An experimental unit was described, as was the functional principle of a fault detector based on differences in dielectric conductivity of rusty and pure iron. It was established that adding extra wafers leads to straightening out equipotential lines on the edges of working electrodes by 7.8 per cent. **Practical importance:** The study established that this fault detector can be used for non-destructive control of rust grade of reinforcement metal of ferro-concrete sleepers, ferro-concrete elements of railroad switches, reinforced concrete support structures etc.

Reinforcement metal, rust, contact line, electrocorrosion, non-destructive diagnostics, lines of flux, electrostatic field, fault detector.

Несущие конструкции контактной сети, к числу которых относятся опоры, являются ответственными нерезервируемыми элементами системы электроснабжения электриче-

ских железных дорог. Надежность опор контактной сети определяет бесперебойность и безопасность движения поездов, поэтому вопросам прочности железобетонных опорных

конструкций на стадии как разработки и проектирования, так и изготовления и эксплуатации всегда уделяется особое внимание.

Для электрифицированных участков железных дорог наибольшей проблемой является электрокоррозия железобетонных опор контактной сети. Излом и падение опоры от воздействия электрокоррозии почти неизбежно влекут за собой обрыв проводов контактной сети, нарушение электроснабжения и режима движения поездов.

В связи с этим особое значение приобретает возможность неразрушающей диагностики состояния железной арматуры в опорах контактной сети с последующими рекомендациями по их дальнейшей эксплуатации.

Методы решения указанной задачи имеют недостатки. Наиболее приемлем метод, основанный на различии в значениях диэлектрической проницаемости ржавого и «здорового» железа [2].

Однако дефектоскоп, реализующий этот метод, имеет нелинейную измерительную характеристику, т. е. недостаточно высокую точность диагностирования, что можно объяснить искажением электростатического поля на краях электродов.

Цель работы – добиться повышения точности диагностирования степени ржавости

железной арматуры опоры за счет повышения однородности поля между рабочими электродами путем добавления дополнительных электропроводящих пластин, электрически не связанных с рабочими электродами.

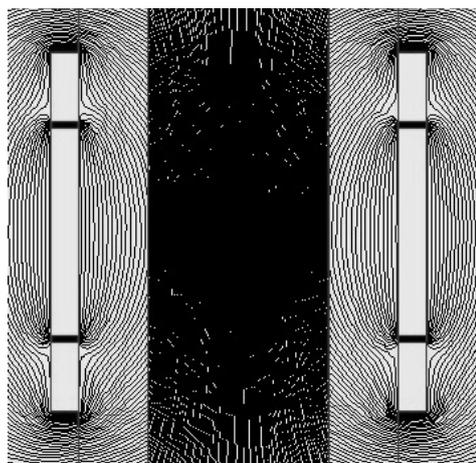
Использование дополнительных электропроводящих пластин приводит к тому, что силовые линии электростатического поля на большей части площади рабочих электродов приобретают линейный характер. Другими словами, значительно ослаблен краевой эффект, так как «искривление» линий электростатического поля происходит на краях не рабочих электродов, а дополнительных пластин. В результате измерительная характеристика становится более линейной.

Расчёт в ELCUT

Для подтверждения данной гипотезы рассчитано плоскопараллельное электростатическое поле в специализированной программе ELCUT. Расчёт включал в себя несколько этапов:

1) представили геометрические параметры задачи, т. е. в натуральную величину изобразили элементы расчёта в специализированной программе ELCUT;

а



б

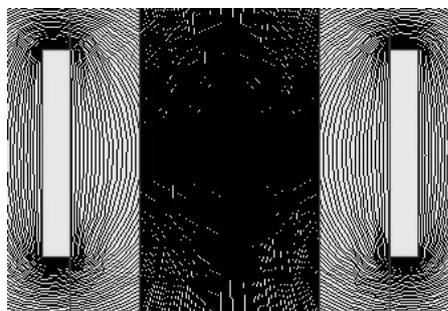


Рис. 1. Картина электростатического поля:
а) без дополнительных пластин; б) с дополнительными пластинами

II) исследуемую область разделили на блоки, однородные по физическим свойствам;

III) провели расчёты электростатического поля (рис. 1).

На рис. 1 видно, что наличие дополнительных пластин приводит к тому, что силовые линии электростатического поля под рабочими электродами приобретают линейный характер.

Экспериментальные исследования

Также для верификации описанного метода выполнено физическое моделирование электростатического поля (в плоскопараллельной постановке) в теле опоры с помощью электропроводящей бумаги (рис. 2).

«Выпрямление» эквипотенциальных линий $3B$ (Δ) на краях рабочих электродов из-за введения дополнительных пластин составило $\sim 7,8\%$:

$$\Delta = \frac{A}{B} \cdot 100\% = \frac{3}{38} \cdot 100\% \approx 7,8\%.$$

На практике рассматриваемая диагностика имеет следующую приборную реализацию (рис. 3). Силовые входы 1 электронного блока 2 с индикатором 3, который представляет собой измеритель емкости, например TESLA BM 591, подключаются к выходам источника питания 4. Измерительные входы 1 электронного блока 2 присоединяются с помощью проводов к электродам 5. Электроды 5 полые, причем боковые 6 и внутренняя стенка 7, которой электрод прижимается к опоре 8, изготовлены из эластичного материала, например из резины, наружная стенка 9 электрода 5 выполнена из электропроводящего материала, например из алюминия или меди. Электроды 5 заполнены порошком 10 из электропроводящего материала, например алюминия. К боковым стенкам электрода жестко прикреплены пластины 11 из диэлектрика, например, фторопласта или гетинакса, к которым жестко прикреплены дополнительные пластины 12 из электропроводящего материала, например меди или алюминия. Позицией 8 обозначен участок опоры, который содержит диагностируемую железную арматуру 13.

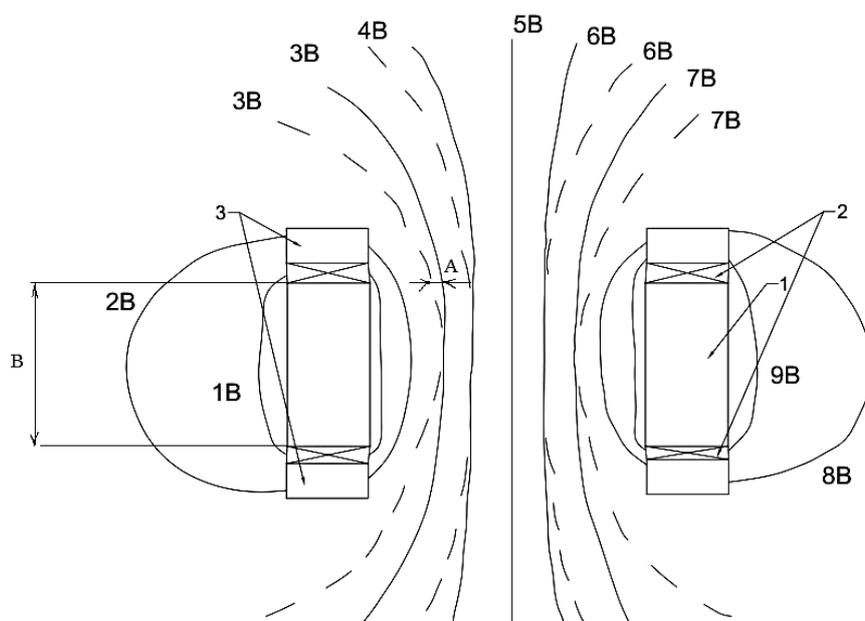


Рис. 2. Картина поля, полученная на основе экспериментальных исследований:
1) рабочие электроды; 2) диэлектрические вставки; 3) дополнительные пластины; сплошные линии – эквипотенциальные линии при дополнительных пластинах, штриховые – без них

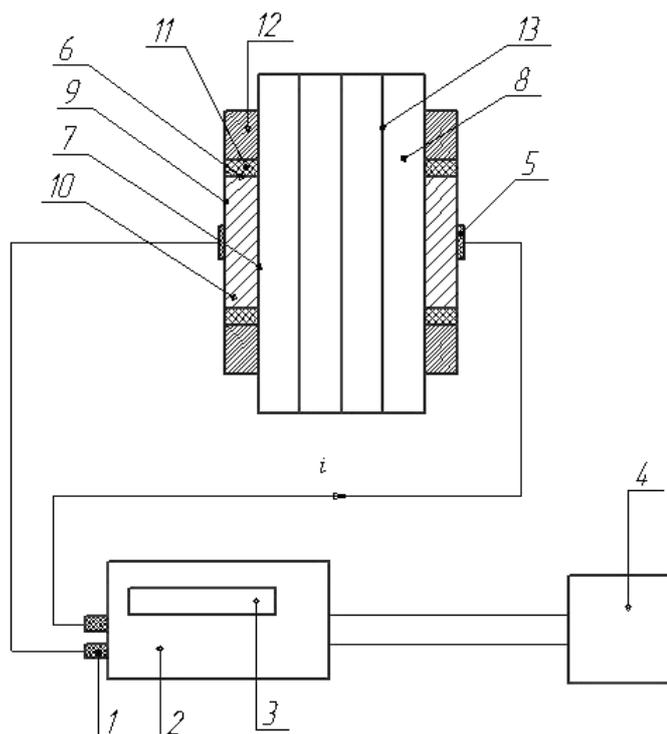


Рис. 3. Схема операции диагностики арматуры опоры:

- 1) силовые входы; 2) электронный блок; 3) индикатор; 4) блок питания; 5) рабочие электроды; 6) боковая стенка; 7) внутренняя стенка; 8) участок опоры; 9) наружная стенка; 10) порошок; 11) диэлектрик; 12) дополнительные пластины; 13) стержни металлические

Диагностика арматуры опоры осуществляется следующим образом. Обкладки, состоящие из рабочих электродов 5 и дополнительных пластин 12, прижимаются к участку опоры 8, который содержит железную арматуру 13. Наружная стенка 9, боковые стенки 6 и внутренняя стенка 7 деформируются в соответствии с рельефом поверхности участка опоры 8, и порошок 10 заполняет пустоты поверхности. Затем источник питания 4 через выходы подключается к силовым входам 1 электронного блока 2. В результате этой операции в цепи, состоящей из последовательно соединенных измерительных входов 1 электронного блока 2, электродов 5, участка опоры 8, содержащей железную арматуру 13, начинает протекать ток (i), под действием которого электронный блок 2 измеряет емкость участка опоры 8 между электродами 5. Согласно формуле

$$C = \epsilon \epsilon_0 \frac{S}{d},$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость участка опоры 8; ϵ_0 – электрическая постоянная, данная емкость зависит от абсолютной диэлектрической проницаемости $\epsilon \epsilon_0$ участка опоры 8 между электродами 5. Если ϵ «здорового» железа составляет ~ 10 [1, с. 415], то ϵ ржавого железа ~ 3 [3, с. 368]. Таким образом, в зависимости от состояния железной арматуры 13 на индикаторе 3 электронного блока, который может иметь вид шкалы, появится показание величины емкости, зависящей от магнитной проницаемости. Шкала индикатора 3 проградуирована по степени ржавости железной арматуры. При градуировке используются образцы, содержащие арматуру с известной степенью ржавости.

Был изготовлен действующий макет дефектоскопа (рис. 4), с помощью которого диагностировали железную арматуру семи специально изготовленных кубических бетонных блоков размерами $15 \times 15 \times 15$ мм.

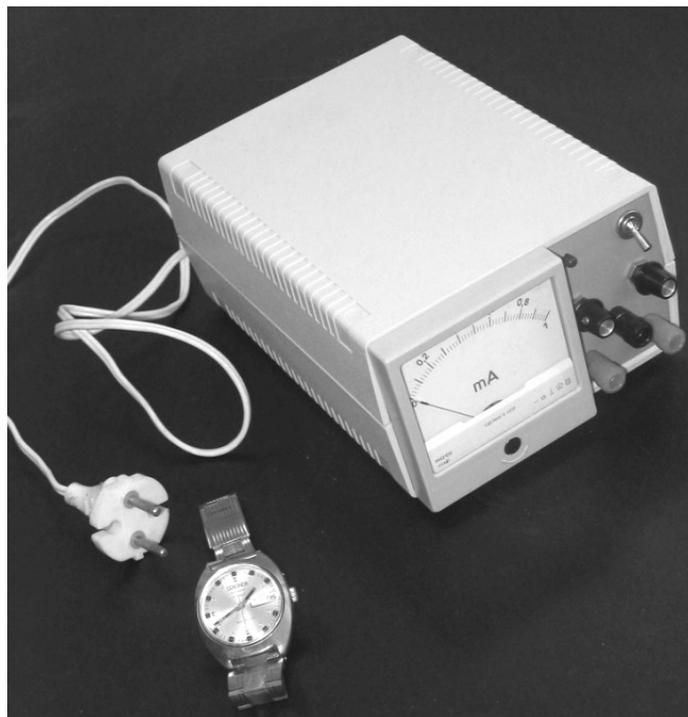


Рис. 4. Дефектоскоп

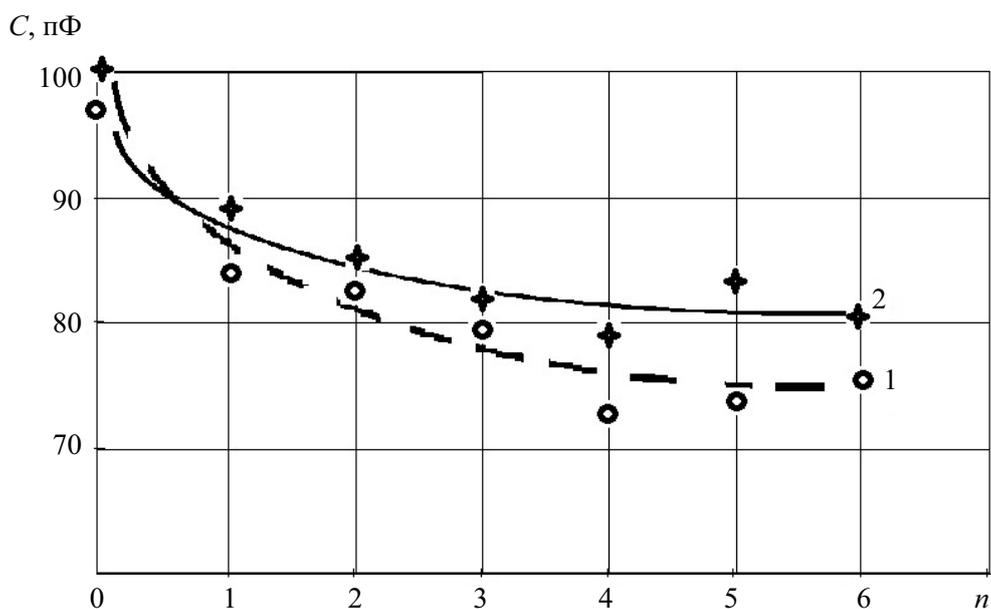


Рис. 5. Зависимости емкости блока от процентного содержания ржавчины при наличии дополнительных пластин (+) и в их отсутствие (o):
 n – номер блока; 1 – без дополнительных пластин; 2 – с дополнительными пластинами

Каждый блок содержал два ряда по 8 арматурных стержней: блок № 0 – без коррозии; № 1 – с 2% коррозии; блок № 2 – 4%; № 3 – 6%; № 4 – 8%; № 5 – 10%; № 6 – 13%.

Процентное содержание коррозии определяли по соотношению диаметров поперечных сечений «здорового» и ржавого сечения стержня. Так как металлические стержни дополнены

рёбрами жёсткости, они в поперечном сечении не круглые, что приводит к погрешности определения степени ржавости. Это основная погрешность нашего исследования, также имеется погрешность прибора, который мы градуировали по степени ржавости.

Результаты измерений емкости блоков приведены на рис. 5.

Более пологий характер кривой 2 очевидно обусловлен увеличением эффективной площади измерительных электродов 5 (см. рис. 3) за счёт дополнительных пластин 12.

Заключение

Появление ржавчины приводит к уменьшению емкости диагностируемого блока, а наличие дополнительных электропроводящих пластин позволяет выравнивать эквипотенциальные линии (демонстрирует более линейный характер зависимости) находящихся под рабочей поверхностью электродов, что в свою очередь дает более равномерную шкалу и как следствие – более точную диагностику.

Данный дефектоскоп можно использовать для неразрушающего контроля степени ржавости железной арматуры железобетонных опор, шпал.

Библиографический список

1. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники / Атабеков Г. И., Купальян С. Д., Тимофеев А. Б., Хухриков С. С. – 4-е изд. – Ч. 2, 3. – М. : Энергия, 1979. – 415 с.

2. Свидетельство на полезную модель № 26850. Дефектоскоп. МПК G 01 N 23/18 Б. И. № 35. 20.12.2002.

3. Скорчеллетти В. В. Теоретическая электрохимия / В. В. Скорчеллетти. – 3-е изд. – Л. : Химия, 1970. – 608 с.

References

1. Atabekov G. I., Kupalyan S. D., Timofeyev A. B. & Khukhrikov S. S. Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki [Theoretical Foundations of Electrical Engineering]. 4th Ed. Is. 2, 3. Moscow, Energiya, 1979. 415 p.

2. Defektoskop [Fault Detector]. Utility Model Certificate No. 26850. МПК G 01 N 23/18 В. I. No. 35. 20.12.2002.

3. Skorchelletti V. V. Teoreticheskaya elektrokhiimiya [Theoretical Electrochemistry]. 3rd Ed. Leningrad, Khimiya, 1970. 608 p.

Работа выполнена при поддержке гранта Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I № 14/6 от 27.11.2014 г. «Электрический дефектоскоп».

КИМ Константин Константинович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, kimkk@inbox.ru; МУШКОВ Евгений Сергеевич – студент, asphodel@mail.ru; НЕСТЕРЦОВ Иван Андреевич – студент; *ПОЛУНИН Игорь Сергеевич – студент, polunin.ig@gmail.com; САЕНКО Дмитрий Алексеевич – студент (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).