Ким К. К., Иванов С. Н.
K. K. Kim, S. N. Ivanov

**МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ ДИАГНОСТИКИ СТЕПЕНИ КОРРОЗИИ АРМАТУРЫ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ОПОРЫ**

**THE METHOD OF THE NONDESTRUCTIVE DIAGNOSIS INVESTIGATING
THE RUSTINESS DEGREE OF THE BEAM REINFORCEMENT**

Ким Константин Константинович – член-корреспондент АЭН РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург). 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Mr. Konstantin K. Kim – member of Russian Academy of electrical engineering, Dr. Sc. (Eng), professor, Head of Theoretical Foundations of Electrical Engineering Department, Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I (Russia, Saint-Petersburg). 190031, Saint-Petersburg, Moscovsky av., 9. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). 681021, Комсомольск-на-Амуре, ул. Котовского, 1-60. E-mail: kem@knastu.ru.

Mr. Sergey N. Ivanov – Doctor of Engineering, Professor, Electrical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). 681021, Komsomolsk-on-Amur, Kotovsky str. 1-60. E-mail: kem@knastu.ru.

Аннотация. В статье рассматривается новый метод неразрушающей диагностики степени ржавости железной арматуры железобетонной опоры, основанный на различии значений диэлектрической проницаемости ржавого и «здорового» железа. Поэтому измеряя электрическую емкость участка опоры, можно судить о наличии ржавой железной арматуры и степени ее ржавости. Для повышения достоверности результатов диагностики предлагается на краях рабочих измерительных электродов устанавливать дополнительные электроды, электрически не связанные с измерительными электродами.

Summary. We consider the new method of the nondestructive diagnosis that investigates the rustiness degree of the beam reinforcement. The method is based on the difference of the rusty and "healthy" iron permittivity magnitude. Therefore, we can make conclusions about the presence of a rusty beam and the degree of its rustiness by measuring the electric capacity of the beam reinforcement section. In order to increase the reliability of the diagnosis results we suggest setting the additional electrodes on the edges of the working measuring electrodes. These additional electrodes are not connected with the working measuring electrodes.

Ключевые слова: железобетонная опора, ржавость, арматура, диэлектрическая проницаемость, электрическая емкость.

Key words: beam reinforcement, rustiness, iron beam, permittivity, electric capacity.

УДК 621. 317.39(075.8)

Введение

Россия обладает одной из крупнейших железнодорожных сетей в мире. Эксплуатационная протяженность сети железных дорог общего пользования составляет 86 000 км, из которых электрифицировано 43 400 км (постоянный ток 3 кВ – 19 000 км, переменный ток 25 кВ 50 Гц – 24 400 км). По протяженности электрифицированных дорог РФ занимает второе место в мире, уступая только Китаю. Одними из основных элементов электрифицированных участков являются несущие конструкции контактной сети, к числу которых относятся железобетонные опоры, являющиеся ответственными нерезервируемыми элементами. От надежности работы опор контактной сети зависит бесперебойность и безопасность движения поездов [1]. Поэтому вопросам прочности

железобетонных опорных конструкций как на стадии разработки и проектирования, так и на стадии изготовления и эксплуатации всегда уделялось особое внимание.

У ОАО РЖД как у сложного технического производства возникает ряд проблем, связанных с электрокоррозией железобетонных опор контактной сети. Электрокоррозия неизбежно приводит к изломам и падениям опор, и как следствие, к обрыву проводов контактной сети, нарушению электроснабжения и режима движения поездов.

На 01.01.2016 г. состояние опорного хозяйства можно назвать критическим. Парк опор контактной сети составляет 1,75 млн опор. Количество опор контактной сети со сроком эксплуатации свыше 40 лет за 2015 г. увеличилось на 12,7 тыс. шт. и составляет 612,3 тыс. опор (35 % от общего парка). Количество опор контактной сети со сроком службы свыше 50 лет за 2015 г. увеличилось на 56,5 тыс. шт. и составляет 303,8 тыс. опор (17,3 % от общего парка). В настоящее время в ОАО РЖД эксплуатируется 74 486 дефектных опор контактной сети (4,26 % от общего парка).

Основным элементом железобетонной опоры является железная арматура, на которую воздействуют электрические токи, обусловленные функционированием электрифицированных дорог постоянного тока. Здесь в качестве обратного провода используются рельсы, которые не изолированы от земли, следовательно, через шпалы и балластный слой путевого полотна часть тягового тока «уходит» в землю, а затем в металлические сооружения, находящиеся в земле, например, в металлическую арматуру опоры. Такие токи называют блуждающими, и они могут достигать 50-60 % тягового тока. Их величина зависит от потенциала рельсов относительно земли, сопротивления рельсов и климатических условий. Наибольшее значение блуждающих токов наблюдается на станционных путях, где имеются относительно малые значения переходных сопротивлений между рельсами и землей и большие величины тяговых токов. Так как электрическая проводимость металлов в сотни миллионов раз больше проводимости почв и грунтов, всякая металлическая конструкция, находясь в зоне распространения блуждающих токов, привлекает на себя эти токи, передает их как проводник более низкого омического сопротивления и возвращает их через землю к источнику постоянного тока. Элемент металлической конструкции, из которой ток выходит в землю, является анодом, а часть сооружения, где постоянный ток входит в него, выполняет функции катода. В анодных зонах при условии контакта конструкции с влажной почвой блуждающие токи вызывают электролиз и приводят к коррозионным разрушениям сооружения. В связи с обозначенной проблемой особое звучание приобретает вопрос о возможности диагностирования состояния железной арматуры в опорах контактной сети, не нарушая её целостную структуру с последующими рекомендациями о возможности дальнейшей эксплуатации последних.

Метод диагностики и устройство для его реализации

На кафедре «Теоретические основы электротехники» Петербургского государственного университета путей сообщения разработан новый метод неразрушающей диагностики степени ржавости железной арматуры железобетонной опоры, основанный на различии значений диэлектрической проницаемости ржавого и «здорового» железа. Если ϵ "чистого железа" составляет ~ 10 , то ϵ ржавого железа ~ 3 . Поэтому, согласно известной прямопропорциональной зависимости электрической емкости от диэлектрической проницаемости, электрическая емкость участка опоры, содержащего ржавую арматуру, будет отличаться от емкости участка, содержащего «здоровую» арматуру.

Для практической реализации метода был создан измеритель электрической емкости [2] на основе функционального генератора [3; 4] (см. рис. 1).

Данный измеритель емкости позволяет существенно расширить область применения емкостных датчиков. Предлагаемый измеритель при малых размерах обладает чувствительностью лабораторных приборов. Имеющиеся образцы прибора при испытаниях показали чувствительность лучше 0,01 пФ. Причем задача добиться наибольшей чувствительности не ставилась, и при уменьшении предела измерений менее 10 пФ чувствительность прибора может быть увеличена.

Рис. 1. Измеритель электрической емкости

Технические характеристики измерителя:

– измерительная характеристика	линейная
– диапазон измерений, пФ	$0,01...10^6$
– рабочая частота, Гц	$100...5 \cdot 10^4$
– предел допускаемой погрешности, %	$0,5...1,0$
– напряжение питания, В	$\pm 1,5... \pm 9$
– потребляемый ток, мА	$2,0...9,0$
– масса, кг, не более	0,3.

Следует отметить, что габаритные размеры, масса и другие технические характеристики определяются используемой элементной базой и могут быть улучшены. Шкала измерителя может быть проградуирована в процентах степени ржавости арматуры. Градуировка осуществляется с использованием образцов, содержащих арматуру с известной степени ржавости. Вход измерителя соединяется с двумя рабочими электродами (емкостной датчик), которые прикладываются к боковой поверхности диагностируемого участка опоры. Для подтверждения работоспособности прибора были изготовлены шесть кубических бетонных блоков с размерами: $15 \times 15 \times 15$ мм. Блок № 1 – содержал два ряда по 8 арматурных стержней (без коррозии), блок № 2 – содержал два ряда по 8 арматурных стержней (с 2 % коррозии); блок № 3 – два ряда по 8 арматурных стержней (с 4 % коррозии); блок № 4 – два ряда по 8 арматурных стержней (со 6 % коррозии); блок № 5 – два ряда по 8 арматурных стержней (с 8 % коррозии); блок № 6 – два ряда по 8 арматурных стержней (с 10 % коррозии). Результаты измерений емкости блоков приведены на рис. 2, где n – номер блока. Кривая 1 – при отсутствии дополнительных электродов, кривая 2 – при наличии дополнительных электродов.

Проблемы

Из-за того, что внешняя поверхность диагностируемого участка опоры имеет различные неровности, каверны и т.п., невозможно было добиться полного прилегания рабочих электродов к боковой поверхности диагностируемого участка опоры, что влияет на достоверность диагностирования. В связи с этим была разработана новая конструкция рабочих электродов, которые были выполнены полыми и заполнены металлическим порошком. Внутренние стенки электродов, прикладываемые к боковой поверхности опоры, изготавливались из эластичного материала, а наружные стенки выполнялись жесткими из электропроводящего материала [5].

Следует также отметить, что на достоверность диагностики при ограниченных продольных размерах рабочих электродов большое влияние оказывает искажение электростатического поля на их краях.

Рис. 2. Зависимости емкости блока от процентного содержания ржавчины

Для уменьшения этого искажения было предложено использовать дополнительные электропроводящие электроды, электрически не связанные с рабочими электродами и расположенные на их краях [6]. Использование дополнительных электропроводящих электродов приводит к более однородному характеру распределения электростатического поля в зазоре между рабочими электродами, так как «искривление» линий электростатического поля происходит не на краях рабочих электродов, а на краях дополнительных электродов. В результате зависимость емкости диагностируемого участка опоры от диэлектрической проницаемости среды межэлектродного пространства становится более линейной. На рис. 3 приведена функциональная схема процесса диагностики.

Силовые входы 1 измерителя емкости 2 с индикатором 3 подключены к выходам источника питания 4. Измерительные входы 5 измерителя емкости 2 соединены с рабочими электродами 6. Электроды 6, выполненные полыми, причем, верхние и нижние края 7 выполнены жесткими, а внутренняя стенка 8, которой электрод 6 прижимается к участку опоры 9, изготовлена из эластичного материала, например из резины. Наружная стенка 10 электрода 6 выполнена из электропроводящего материала, например из алюминия или меди. Электроды 6 заполнены металлическим порошком 11, например алюминиевым, железным или медным. К верхним и нижним краям 7 электродов 6 жестко прикреплены пластины 12, изготовленные из диэлектрика, например фторопласта или гетинакса, к которым жестко прикреплены дополнительные электроды 13 из электропроводящего материала, например меди или алюминия. Участок опоры 9 содержит диагностируемую железную арматуру 14. На рис. 4 показана картина поля при отсутствии (а) и при наличии (б) дополнительных электродов.

Рис. 3. Схема процесса диагностики

Работа устройства происходит следующим образом. Обкладки, состоящие из электрода 6 и дополнительных электродов 13, прижимаются к участку опоры 9, который содержит железную арматуру 14. Внутренняя стенка 8 электрода 6 деформируется в соответствии с рельефом поверхности участка опоры 9, и порошок 11 заполняет пустоты поверхности. Наличие дополнительных электродов 13 приводит к тому, что силовые линии электростатического поля под рабочими основными электродами 6 не «искривляются». «Искривление» линий электростатического поля происходит на краях дополнительных электродов. Затем измеряется емкость участка опоры 9 между электродами 6, которая связана с диэлектрической проницаемостью материала опоры сле-

дующим соотношением $C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{d}$, где ε – относительная проницаемость участка опоры δ , ε_0 – электрическая постоянная; S – площадь рабочего электрода; d – расстояние между электродами.

Рис. 4. Распределение силовых линий электростатического поля

Влияние дополнительных электродов на однородность электростатического поля

Для подтверждения выдвигаемой в работе гипотезы были проведены расчёты электростатического поля в пакете ELCUT. Данная программа позволяет проводить двумерное и трёхмерное моделирование электростатических полей, используя метод конечных элементов. Электростатическое поле формируется за счёт приложенного потенциала объёмными, поверхностными и точечными зарядами.

Положительный электрод имеет потенциал $\varphi_0 = 1$ В, а отрицательный – $\varphi_0 = -1$ В и они находятся в воздушном пространстве с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_{\text{возд}} = 1$. Между электродами располагается железобетонный фрагмент участка опоры с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_{\text{бетон}} = 4,5$. Дополнительные электроды имеют нулевой потенциал $\varphi_0 = 0$ В, т.к. они изолированы от рабочих электродов. Геометрические параметры системы: высота рабочих электродов – $h_{\text{раб.эл}} = 300$ мм, высота дополнительных электродов – $h_{\text{доп.эл}} = 100$ мм, высота участка опоры – $h_{\text{опоры}} = 2950$ мм, диаметр опоры – $d_{\text{опоры}} = 460$ мм.

Задача сводится к анализу электростатических полей в двухмерной постановке и трёхмерной постановке. Задача формулируется в виде уравнения Пуассона относительно скалярного электрического потенциала φ . Свойства среды считаются изотропными с постоянной диэлектрической проницаемостью. В расчётах используется декартова система координат и единицы длины – сантиметры. На внутренних и внешних границах области действует граничное условие Дирихле, которое задает известное значение электрического потенциала φ_0 в вершине или на ребре модели (например на электродах 1, 2). Очерчиваются границы расчётной области, где в натуральную величину изображаются элементы расчёта (размер опоры, электроды). Для корректности расчётов принимаются границы расчётной области, превышающие размеры исследуемого поля в 3...5 раз.

Пространство исследуемого электростатического поля содержит следующие среды: воздух, диэлектрик (гетинакс), бетон и железная арматура, а также два электрода, изготовленные из одного материала. В качестве параметров учитываются относительные диэлектрические проницаемости бетона, воздуха и гетинакса, значения ε_r , которых соответственно составляют 4,5; 1; 6. Плотность электрического заряда равна нулю, $\rho = 0$ Кл/м³.

По произведённым расчетам получено распределение потенциала и напряжённости, приведенное на рис. 5 и 6.

Рис. 5. Картина электростатического поля, полученная с помощью пакета ELCUT:
а – без дополнительных электродов; б – с дополнительными электродами

Рис. 6. Линии напряженности:
а – без дополнительных электродов; б – с дополнительными электродами

Экспериментальное исследование электростатического поля

Для верификации описанного метода выполнено экспериментальное исследование электростатического поля (в плоскопараллельной постановке) в теле опоры с помощью электропроводящей бумаги. Исследование проводилось с основными электродами из холоднокатаной отожжённой листовой стали шириной 284 мм, толщиной 1,5 мм, воздушный зазор между рабочими электродами и алюминиевыми дополнительными электродами 3 мм. Размеры дополнительных электродов: ширина 11 мм, толщина 2 мм.

Распределение электростатического поля между рабочими электродами 1 приведено на рис. 7. Сплошными линиями показаны эквипотенциальные линии при наличии дополнительных электродов 3, штриховыми – при их отсутствии. Позициями 2 показаны диэлектрические вставки.

Рис. 7. Картина электростатического поля, полученная с помощью электропроводящей бумаги

«Выпрямление» эквипотенциальных линий 3 В (Δ) на краях рабочих электродов из-за введения дополнительных электродов составило

$$\Delta = \frac{A}{B} \cdot 100 \% = \frac{3}{38} \cdot 100 \% \approx 7,8 \%, \quad (1)$$

где A – отклонение эквипотенциальных линий, полученных при отсутствии дополнительных электродов от линий, полученных при наличии дополнительных электродов; B – высота рабочих электродов.

Экспериментальное исследование электростатического поля выполнено в проводящей среде (моделирование электростатического поля с помощью электролитической ванны). При проведении экспериментального исследования использована аналогия между электростатическим полем в диэлектрике и полем постоянного тока в проводящей среде при одинаковых граничных условиях.

Уравнения поля постоянного тока в проводящей среде будут аналогичными уравнениям электростатического поля в диэлектрике. При этом величинам $\delta; I; \gamma$ (плотность тока, ток, удельная проводимость соответственно) в первом поле соответствуют величины во втором поле $D; q; \epsilon$ (электрическое смещение, количество электричества, диэлектрическая проницаемость). Если форма поверхностей электродов будет такая же, как форма поверхностей заряженных тел, и если соотношение между токами I , вытекающими из электродов, будет таким же, как соотношение между зарядами q на поверхности тел, то картина поля тока будет такой же, как картина электростатического поля. Основная задача, выполняемая в ходе экспериментального исследования, сводится к получению данных о реальном распределении потенциала между полукруглыми электродами и оценке степени однородности электростатического поля на оси симметрии такой конструкции.

Экспериментальная установка содержит диэлектрическую ванну с электропроводящей жидкостью (вода). В ванне установлены рабочие электроды, подключенные к источнику тока и создающие в воде электрическое поле, которое подлежит исследованию. Для определения потенциала в конкретной точке используется измерительный зонд, подключенный к вольтметру. Для автоматического воспроизведения перемещений зонда на чертеже использовалась пантографная система. Эквипотенциальная поверхность формируется в виде набора точек на листе бумаги, найденных с помощью зонда и пантографа. Если через электролит течет постоянный ток, то условие однородности проводящей среды нарушается. В результате разложения электролита в около

электродных областях происходит поляризация электродов, связанная с выделением пузырьков водорода, кислорода и других продуктов электролиза. Электролит становится неоднородным, что приводит к искажению поля. Для исключения этого на электроды подавалось напряжение 100 В промышленной частоты 50 Гц. Для уменьшения искажения поля, вносимого зондом, применяется увеличенная модель.

На рис. 8 представлены картины поля между рабочими электродами, полученные в результате моделирования с помощью электролитической ванны. Сплошными линиями показаны эквипотенциальные линии при отсутствии дополнительных электродов, а штриховыми – при их наличии.

«Выпрямление» эквипотенциальных линий (Δ) на краях рабочих электродов из-за введения дополнительных электродов, рассчитанное по (1), составило приблизительно 11,5 %.

Выводы

1. Из-за разности величин диэлектрических проницаемостей подверженного коррозии и «чистого» железа можно по величине электрической емкости участка железобетонной опоры, содержащей диагностируемую железную арматуру, судить о степени коррозии последней.

2. Для повышения достоверности диагностики следует использовать дополнительные электроды, электрически не связанные с рабочими электродами и установленные на краях последних.

Рис. 8. Картина поля, полученная с помощью электролитической ванны

ЛИТЕРАТУРА

1. Ким, К. К. Анализ влияния конструкционных факторов на надежность герметичных электромеханических преобразователей / Д. А. Голоколос, Н. С. Карпова, С. Н. Иванов, К. К. Ким // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2013. – № IV-1(16). – С. 29-34.
2. Свидетельство на полезную модель 26850, Российская Федерация МПК⁷ G 01N 23/18. Электрический дефектоскоп / Ким К. К., Барбарович В. Ю., Смирнов В. А., Паленик В. И.; заявитель и патентообладатель Петербургский государственный университет путей сообщения. – № 2002116598/20; заявл. 24.06.2002; опубл. 20.12.2002. Бюл. № 35. – 4 с.
3. Пат. 2221327 Российская Федерация, МПК⁷ H03K3/02. Функциональный генератор / Ким К. К., Барбарович В. Ю., Асмус В. И.; заявитель и патентообладатель Петербургский государственный университет путей сообщения. – № 2001121641/09; заявл. 01.08.2001; опубл. 10.01.2004. Бюл. № 1. – 4 с.
4. Ким, К. К. Автономный измеритель малых электрических емкостей с линейной характеристикой / К. К. Ким, В. Ю. Барбарович // Измерительная техника. – 2003. – №7. – С. 27-31.
5. Пат. 49268 Российская Федерация МПК⁷ B65G 67/30 B65G 69/20. Дефектоскоп / Ким К. К.; заявитель и патентообладатель Петербургский государственный университет путей сообщения. – № 2005118494/22; заявл. 14.06.2005; опубл. 10.11.2005. Бюл. № 31. – 4 с.
6. Пат. 155814 Российская Федерация МПК⁷ B65G 67/30 B65G 69/20. Дефектоскоп / Ким К. К., Титова Т. С., Мушков Е. С., Полуниин И. С.; заявитель и патентообладатель Петербургский государственный университет путей сообщения. – № 2015115343/28; заявл. 23.04.2015; опубл. 20.10.2015. Бюл. № 29. – 4 с.