

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОКОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО ПАРАМЕТРАМ ИЗМЕНЕНИЯ ЦВЕТА НА ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИИ

В статье показан один из факторов, влияющий на образование коррозии полых железобетонных конструкций — токи утечки в изоляторах. Развитие коррозии зависит от количества электричества, прошедшего через армированный железобетон. Предложена методика контроля коррозионного состояния по изменению параметров цвета на видеоизображении поверхности железобетона. Проведен натурный эксперимент на образцах, имитирующих различную степень коррозии, а также на образце с неизвестным уровнем коррозии. Изображения получены при помощи промышленного эндоскопа.

Ключевые слова: железобетонные опоры, коррозия, токи утечки, изоляторы, визуальный контроль, видеоизображение, параметры цвета.

Железобетонные опоры используются для поддержания проводов линий электропередач, контактной сети железных дорог и городского электротранспорта. К таким элементам устройства электроснабжения предъявляются высокие требования по надежности. В процессе эксплуатации железобетонные опоры, заглубленные в грунт, подвергаются коррозии. Под воздействием электрического тока, обусловленного утечками в элементах изоляции, коррозионным изменениям подвергается как бетонный камень, так и арматура опор контактной сети [1].

Электрокоррозия в большей степени возникает по причине нарушения свойств изоляторов, железобетонных опор, поддерживающих линии электроснабжения [2–3]. При уменьшении сопротивления границы раздела арматура-бетон-изоляторы-токоведущие элементы по арматурным стержням начинают протекать токи утечки, стекающие в грунт.

Другим явлением, вызывающим токи в арматурных стержнях, является наведение токов в спиральной части стальной арматуры при больших значениях тяговых токов в контактной сети железнодорожного транспорта, подробно описанное в работе [4].

Имеется ряд особенностей, которые необходимо учитывать при изучении образования коррозии бетона и арматуры, не имеющей непосредственного контакта с окружающей средой. Бетон является пористо-капиллярным телом, поэтому влага из окружающей среды поступает к границе разде-

ла «арматура-бетон». Арматура в бетоне находится в состоянии термодинамической устойчивости. При незначительной анодной поляризации на границе раздела образуется труднорастворимая пленка вследствие многостадийного процесса окисления железа.

На первой стадии железо переходит в раствор с образованием гидроксида железа $\text{Fe}(\text{OH})_2$, при дальнейшем окислении $\text{Fe}(\text{OH})_2$ взаимодействует с растворенным кислородом, образуя еще более труднорастворимый гидрат окиси железа.

Эти вторичные продукты могут претерпевать изменения с образованием сложных гидратированных окислов $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{NH}_2\text{O}$, известных как ржавчина [5].

На третьей стадии окисления железа образуется пассивная пленка, состоящая из Fe_2O_4 и Fe_2O_3 . При дальнейшем увеличении потенциала арматуры и плотности тока через границу раздела «арматура-бетон» происходит разрушение пассивной пленки и начинается интенсивный процесс коррозионного разрушения железа с образованием всех промежуточных составляющих. Увеличивающийся объем продуктов коррозии ведет к увеличению давления в приэлектродном слое, что приводит к разрушению бетона и появлению трещин. Поступающая к границе раздела влага из окружающей опору среды ведет к уменьшению величины pH, и коррозионный процесс продолжается до полного разрушения арматуры. Вследствие явления диффузии продукты коррозии направляются к поверхности железобе-

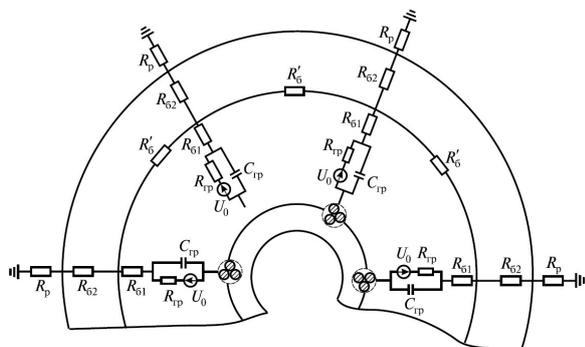


Рис. 1. Электрическая схема замещения элементов подземной части железобетонной опоры

Таблица 1

Параметры образцов с искусственной коррозией

Образец №	Масса образца в сыром виде, г	Масса $FeCl_3$, г	Процентное содержание $FeCl_3$, %
1	511	—	—
2	497	—	—
3	496	5	1,0
4	493	5	1,0
5	539	10	1,9
6	508	10	1,9
7	505	15	3,0
8	507	15	2,9
9	492	20	4,1
10	513	20	3,9
11	498	25	5,0
12	486	24,3	5,0
13	464	36,2	7,8
14	425	33,2	7,8

тона, проявляясь в виде изменения цвета поверхности.

Таким образом, в пассивном состоянии должны наблюдаться высокая поляризуемость арматуры, высокое значение сопротивления границы раздела и сопротивления бетона, в активном — незначительная величина как сопротивления границы раздела, так и сопротивления бетона.

Учитывая сложную зависимость процессов, протекающих на границе раздела «арматура-бетон», и отсутствие достоверной математической модели, зависимость между током, стекающим с арматуры, и ее потенциалом $I = f(\phi)$ можно определить экспериментально. Граница раздела «арматура-бетон» на электрической схеме замещения может быть представлена элементами R_{TP} , C_{TP} и U_0 .

Сопротивление R_{TP} характеризует интенсивность окислительного процесса. Емкость C_{TP} создается на границе раздела «металл-электролит». Одной об-

кладкой является металл арматуры, другой — жидкий приэлектродный слой из диссоциированных и полярных молекул. Сопротивление бетона R_G — сопротивление от границы раздела «арматура-бетон» до внешней границы опоры определяется параметрами бетона и внешней среды. Сопротивление растеканию R_p замещающей площади опоры определяется параметрами грунта. Так как арматурный каркас опоры состоит из отдельных элементов, которые, в свою очередь, состоят или из отдельных прутков арматурной стали, или отдельных проволок арматурной стали различного сечения, имеющих между собой электрический контакт, то схема замещения будет представлять собой периодическую совокупность ячеек с эквивалентными параметрами, как показано на рис. 1.

При определении параметров схемы замещения границы раздела «арматура-бетон» использовалась методика, приведенная в работе [5]. По результатам измерений переходных процессов, обуславливающих поляризацию железобетонной опоры, определялись элементы схемы замещения и характер их изменения в зависимости от степени коррозионного износа арматуры и бетона.

Важное место при эксплуатации железобетонных конструкций, эксплуатируемых на открытых участках, отводится диагностированию и своевременному техническому обслуживанию или замене остродефектных объектов. В настоящее время известен ряд методов диагностирования, каждый из которых дополняет другие для получения достоверной диагностической информации.

В работе приводится методика обработки оптических изображений поверхности железобетонных опор, имеющих коррозионные дефекты, полученных при помощи технических средств визуального контроля.

В качестве близких аналогов рассматривались методики определения количественного состава продуктов коррозии при определении степени разложения арматурных стержней [6–8].

Для определения коррозионного состояния строились градуировочные зависимости изменения концентрации продуктов коррозии на основе окислов железа от изменения интенсивности спектральных линий. Далее определялись параметры зависимости изменения площади поперечного сечения арматурных стержней от концентрации продуктов коррозии на поверхности бетона.

В работе [9] описано устройство для регистрации панорамного изображения внутренней подземной поверхности, которая наиболее подвержена появлению коррозионных дефектов. Данные повреждения появляются в областях поверхности, имеющей высокие показатели электрической проводимости, обуславливающей стекание электрического тока в грунт. Обработке изображений, содержащих коррозионные дефекты в виде бурых пятен на поверхности бетона, посвящена данная работа.

Для проведения эксперимента были подготовлены образцы с заданным количеством хлорида железа в бетоне. Таким образом, для анализа изменения цвета поверхности использовались образцы с известной концентрацией продуктов коррозии в виде $FeCl_3$, имитирующего разложение арматурных стержней.

Образцы выполнены из бетона М300, применяемого в опорах контактной сети. В составе использовались компоненты: цемент, песок, вода в пропорции 1:1,9:0,5, без щебня, не влияющего на качество



Рис. 2. Изображения поверхности бетонных образцов с различным содержанием $FeCl_3$

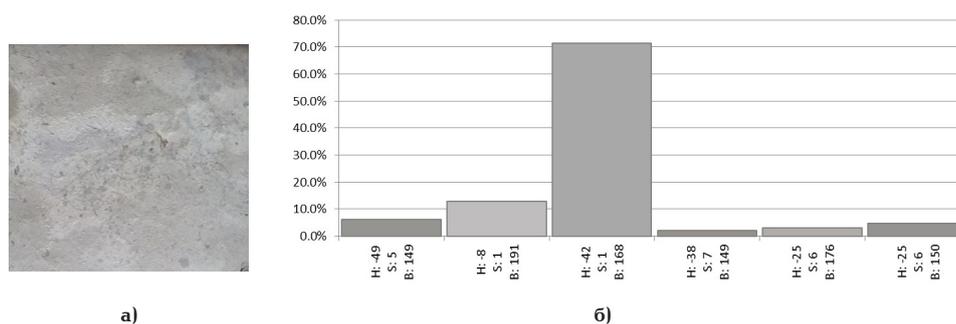


Рис. 3. а) анализ изображения образца № 1; б) гистограмма цветов

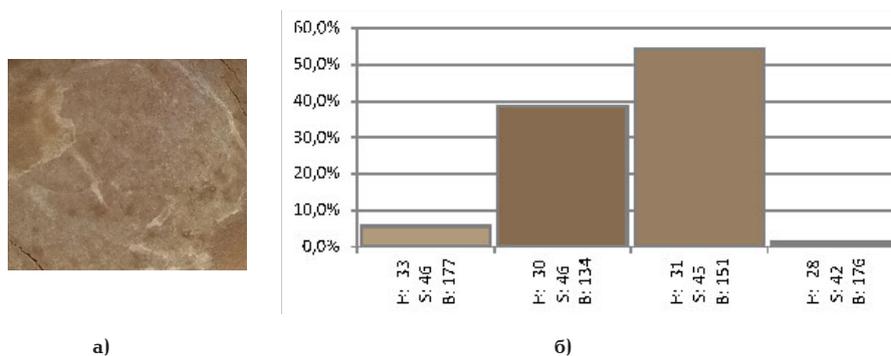


Рис. 4. а) анализ изображения образца № 13; б) гистограмма цветов

и параметры поверхности. Для эксперимента было изготовлено 14 образцов в виде куба размером $7 \times 6 \times 6$ см. Содержание хлорида железа, масса образцов и их наименование приведены в табл. 1.

Изображения образцов с различным содержанием хлорида железа показаны на рис. 2. Как видно из рис. 2, наблюдается изменение цвета с увеличением концентрации продуктов коррозии [10]. В левом верхнем углу находится изображение исходного бетона, далее слева направо расположены образцы с увеличением концентрации $FeCl_3$ (образцы 1, 2, 3, 6, 7, 9, 11, 13).

Для обработки изображений предлагается использовать векторный анализ, в основу которого положен переход от трехкомпонентного представления цвета в системе RGB к векторному, которое является аналогом HSB -представления. На основе векторного представления выполняется кластеризация изображения по цветам.

В HSB -модели цвет представляется тремя компонентами: тон (*Hue*), насыщенность (*Saturation*) и яркость (*Brightness*). Тон и насыщенность удобно представлять вектором на комплексной плоскости: тон задается углом поворота вектора, а насыщенность — длиной вектора. Для удобства анализа полученных данных угол вектора задается в диапазоне от -180° до 180° , а длина вектора — от 0 до 255. Эти два параметра напрямую определяют цвет точки фотографируемой поверхности.

Низкое значение насыщенности показывает, что все три RGB -составляющие цвета сбалансированы, и цвет близок к нейтральному серому. Однако это может быть как темно-серый, так и светло-серый цвет в зависимости от абсолютной величины RGB -составляющих цвета. Поэтому необходим третий параметр, описывающий яркость цвета (уровень освещенности соответствующего участка фотографии).



Рис. 5. Шкала характерных цветов исследуемых образцов



Рис. 6. Фотография исследуемой бетонной поверхности

При проведении эксперимента были получены фотографии образцов с различной концентрацией $FeCl_3$. По итогам обработки изображений получено, что при угле поворота (H) вектора цвета в диапазоне от -30° до -10° и длине вектора (S) не менее 10 единиц полученный цвет соответствует ржавчине. Например, на рис. 2 показан результат программной обработки фотографии участка бетона со следами электрокоррозионного разрушения с неизвестным составом продуктов коррозии на поверхности. На рис. 3 показан результат обработки данного изображения в виде гистограммы основных присутствующих на фото цветов.

Изображения отдельных образцов с наименьшим и наибольшим содержанием $FeCl_3$ с гистограммами разложения на составляющие цветов представлены на рис. 3 и 4 соответственно.

Выбрав из гистограммы для каждого из исследуемых образцов по два характерных цвета, получим шкалу, соответствующую изменению количественного содержания примеси $FeCl_3$. Для построения цветовой шкалы использованы изображения восьми образцов, представленных на рисунках выше. Концентрация хлорида железа изменялись от 0 до 7,8 % согласно данным табл. 1. Шкала изменения цвета, полученная из характерных цветов на гисто-

граммах всех образцов, представлена на рис. 5. Снизу приведены количественные содержания хлорида железа в процентах.

Например, на рис. 6 показан результат программной обработки фотографии участка бетона со следами электрокоррозионного разрушения с неизвестным составом продуктов коррозии на поверхности. Процесс подготовки образцов с различным уровнем коррозии подробно описан в работе [5]. В зависимости от количества электричества подвергаются коррозии арматурные стержни. Продукты коррозии в силу явления диффузии перемещаются от арматурных стержней к поверхности, при этом происходит изменение цвета поверхности.

На рис. 7 показан результат обработки данного изображения в виде гистограммы основных присутствующих на фото цветов.

Выделенные пять участков показывают примерное процентное соотношение поверхности со следами коррозии по отношению к общей площади фотографируемой поверхности.

В данном случае продукты коррозионного разрушения занимают около 18 % поверхности, причем наиболее яркие проявления коррозии видны на 4,8 % поверхности. Сравнение цвета на выделенных участках коррозии с элементами цветовой шкалы на рис. 5 позволяет определить ориентировочное значение продуктов коррозии с концентрацией около 5 %.

Гибкая настройка программного алгоритма анализа изображений позволяет настраивать чувствительность системы к различиям цветов, таким образом уменьшая количество интервалов на гистограмме рис. 7, позволяет нам ориентироваться на фиксированные интервалы с целью определения категории по уровню коррозионного разрушения.

Продолжением исследований станет уточнение количественных оценок содержания продуктов коррозии на поверхности произвольных образцов бетона и их сравнение с изображениями образцов с известным содержанием продуктов электрокоррозии.

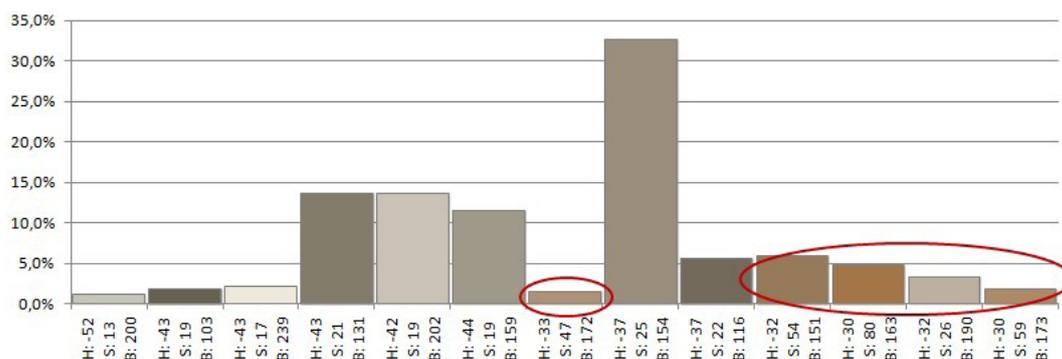


Рис. 7. Результат обработки изображения

Библиографический список

1. Подольский В. И. Железобетонные опоры контактной сети. Конструкции, эксплуатация, диагностика: моногр. Москва: Интекст, 2007. 152 с. ISBN 978-5-89277-081-8.
2. Кузнецов А. А., Кузьменко А. Ю. Результаты испытания переносного прибора контроля изоляторов контактной сети // Омский научный вестник. 2015. № 1 (137). С. 120–123.
3. Бессонов В. А., Матющенко В. С., Балабанов В. Н. Определение токов в арматуре железобетонных опор контактной сети, индуцированных тяговой нагрузкой // Совершенствование и повышение эффективности устройств системы тягового электроснабжения в условиях Дальнего Востока и БАМ: межвуз. сб. науч. тр. Хабаровск: Изд-во ХаБииЖТ, 1992. 65 с.
4. Ли В. Н., Демина Л. С. Модель промежуточной консольной железобетонной опоры контактной сети электрифицированных железных дорог, учитывающая эксплуатационные воздействия // Транспорт Урала. 2019. № 4 (63). С. 80–85.
5. Котельников А. В., Кандаев В. А. Блуждающие токи и эксплуатационный контроль коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта: моногр. Москва: Изд-во УМЦ ЖД, 2013. 552 с.
6. Брюхова А. С., Волкова Н. В., Кузьменко А. Ю. Определение химического состава на внутренних поверхностях полых железобетонных конструкций при воздействии коррозии // Омский научный вестник. 2020. № 5 (173). С. 123–128. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-173-123-128.
7. Кузнецов А. А., Пономарев А. В., Фомиченко К. И. Исследование процесса коррозии железобетонных опор контактной сети с оценкой параметров прочности // Известия Транссиба. 2020. № 2 (42). 26–34.
8. Zhang X., Xiao K., Dong C. [et al.]. In situ Raman spectroscopy study of corrosion products on the surface of carbon steel in solution containing Cl and SO₄ // Engineering Failure Analysis. 2011. Vol. 18. P. 1981–1989.
9. Kuznetsov A. A., Ponomarev A. V., Sharapova Ya. V. Optical Controls Application for Diagnostics Corrosion Condition of Reinforced Concrete Structures // IOP Conference Series: Earth and Environmental. 2021. Vol. 720. DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012143.
10. Кузнецов А. А., Пономарев А. В., Зверев А. Г., Волчанин Г. В. Мехатронный комплекс диагностирования коррозионного состояния внутренней поверхности железобетонных опор контактной сети // Омский научный вестник. 2021. № 5 (179). С. 50–55. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-50-55.

онного состояния внутренней поверхности железобетонных опор контактной сети // Омский научный вестник. 2021. № 5 (179). С. 50–55. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-50-55.

КУЗНЕЦОВ Андрей Альбертович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск.

SPIN-код: 5259-0531

AuthorID (РИНЦ): 358976

ORCID: 0000-0002-1815-4679

AuthorID (SCOPUS): 56824984500

Адрес для переписки: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

ПОНОМАРЕВ Антон Витальевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 8927-5050

AuthorID (РИНЦ): 514134

AuthorID (SCOPUS): 57206470876

Адрес для переписки: antonyswork@gmail.com

КУЗЬМЕНКО Антон Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 3897-7011

AuthorID (РИНЦ): 1013551

Адрес для переписки: kuzo17@yandex.ru

ВОЛЧАНИН Георгий Викторович, аспирант кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

Адрес для переписки: vev_7@bk.ru

Для цитирования

Кузнецов А. А., Пономарев А. В., Кузьменко А. Ю., Волчанин Г. В. Определение электрокоррозионного состояния железобетонных конструкций по параметрам изменения цвета на видеоизображении // Омский научный вестник. 2022. № 3 (183). С. 75–79. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-183-75-79.

Статья поступила в редакцию 04.04.2022 г.

© А. А. Кузнецов, А. В. Пономарев, А. Ю. Кузьменко,

Г. В. Волчанин