



УДК 620.111.2: 62-523.2  
DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-50-55

**А. А. КУЗНЕЦОВ**  
**А. В. ПОНОМАРЕВ**  
**А. Г. ЗВЕРЕВ**  
**Г. В. ВОЛЧАНИН**

Омский государственный  
университет путей сообщения,  
г. Омск

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОКОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ

В статье рассматривается устройство диагностирования электрокоррозионного состояния полых железобетонных опор контактной сети и линий электропередач. Работа устройства основана на применении визуального метода контроля электрокоррозионных дефектов. Предложена конструкция видеоэндоскопа, обеспечивающая повышение качества изображения, за счет устранения колебаний положения гибкого оптического зонда при его вертикальном перемещении, повышение уровня автоматизации процесса диагностирования с регистрацией координат дефектов и документального подтверждения в виде пополняемой базы данных изображений объекта диагностирования — внутренней поверхности полых железобетонных опор от поверхности грунта до их основания.

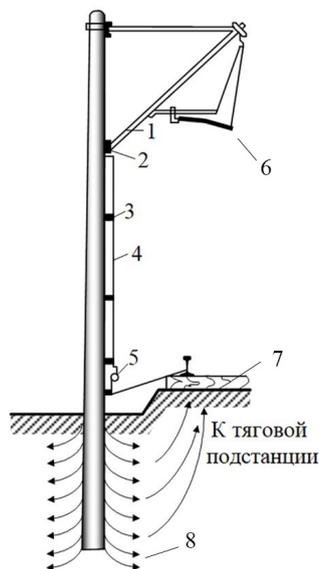
**Ключевые слова:** полые железобетонные опоры, электрокоррозионное состояние, диагностирование, видеоэндоскоп, автоматизированный электропривод, панорамное изображение.

В настоящее время железобетонные конструкции находят широкое применение на электрифицированном транспорте. Однако по некоторым причинам происходит снижение срока службы опор контактной сети и потеря ими несущей способности. Это приводит к разрушению контактной сети, что влечет за собой крупные экономические потери. Основной причиной разрушения опор контактной сети является электрохимическая коррозия стальной арматуры железобетонной конструкции, которую вызывают блуждающие токи.

В контактной сети широко используются изоляторы, которые предназначены для изоляции токоведущих частей контактной сети. Но при возникновении механических повреждений и пробоев изоляторов, вызванных атмосферными перенапря-

жениями и химическими процессами в конструкции, возникает ток утечки, который протекает с изоляторов в землю через железобетонную опору контактной сети [1]. Токи утечки, суммируясь в земле, создают поле блуждающих токов электрифицированного рельсового транспорта (рис. 1).

В опорах контактной сети системы электроснабжения постоянного тока положительный потенциал находится на контактном проводе 6, а нулевой потенциал — на рельсе 7, связанным с нулем тяговой подстанции. При возникновении перенапряжений в контактной сети срабатывает искровой промежуток 5, заземляющий провод 4 замыкается на рельс 7, что приводит к срабатыванию системы релейной защиты. При нарушении изолирующих свойств элементов 2 и 3 часть тока проходит по арматуре



**Рис. 1. Влияние токов утечки на коррозионное состояние арматуры:**

- 1 — арматура контактной сети;
- 2 — изоляция;
- 3 — изолирующие прокладки;
- 4 — заземляющий провод;
- 5 — искровой промежутки;
- 6 — место закрепления контактного провода;
- 7 — рельс; 8 — токи утечки

железобетонной опоры, вызывая ее коррозию, что может привести к потере прочности с возможностью ее дальнейшего падения.

К настоящему времени физико-химические и механические процессы разрушения железобетона при коррозии арматуры достаточно хорошо изучены. Защита арматуры от коррозии в железобетонных конструкциях в значительной степени основана на пассивирующем действии щелочной среды, образующейся в процессе гидратации и твердения цементного камня. Из-за пористой структуры бетона его защитный слой не в состоянии оградить полностью арматуру от внешней среды. Бетон проницаем для различных веществ, в том числе для воды и кислорода [2]. В большинстве случаев коррозия арматуры в бетоне представляет собой электрохимический процесс.

Основной причиной снижения прочностных характеристик железобетона является коррозия стальной арматуры, находящейся в бетоне. Попадание внешних агрессивных сред (хлориды, сульфаты) приводит к повышению скорости коррозии арматуры и, как следствие, к разрушению бетона [3, 4].

Существующие методы диагностирования железобетонных опор КС помогают решить задачу выявления предаварийного состояния, но имеют ряд недостатков [5]:

- метод откопки опор является трудозатратным из-за откопки опоры и влияния человеческого фактора;

- индуктивный метод также требует откопки опоры; влияние на показание прибора внешнего электромагнитного поля; невозможность диагностирования через арматурную сетку; влияние изменения толщины защитного слоя и усилия прижима датчика; наличие коррозии определяется по косвенным показателям;

- акустический и электрохимический методы определяют наличие коррозии по косвенным признакам;

- вибрационный метод позволяет диагностировать лишь надземную часть, тем самым не определяя наличие и степень коррозии.

Перспективное устройство для диагностирования коррозионного состояния основано на определении количественного состава продуктов коррозии арматуры на труднодоступных поверхностях железобетонных изделий на основе лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС). Сущность устройства заключается в том, что через вентиляционное отверстие внутрь железобетонной опоры опускается волоконно-оптический кабель (ВОК), на конце которого закреплена фокусирующая оптика. ВОК с фокусирующей оптикой перемещают вдоль внутренней поверхности опоры и делают необходимое количество измерений количественного состава продуктов коррозии [6, 7].

Недостатком устройства является сложность точного наведения лазера на предполагаемый дефект и невозможность отсчета координат предполагаемого дефекта.

Сущность предлагаемого технического решения для диагностирования электрокоррозионного состояния полых железобетонных опор заключается в применении визуального контроля на основе видеоэндоскопа, повышении качества регистрируемого изображения и распознавания типа дефекта (трещина, скол, разрушение и др.), за счет устранения колебаний положения гибкого оптического зонда при его вертикальном перемещении, повышения уровня автоматизации процесса диагностирования с регистрацией координат дефектов и документального подтверждения в виде пополняемой базы данных изображений объекта диагностирования — внутренней поверхности железобетонных опор от поверхности грунта до их основания.

Предлагаемое устройство диагностирования коррозионного состояния внутренней поверхности железобетонных опор представляет собой мехатронный комплекс с управлением перемещения гибкого зонда видеоэндоскопа. Мехатронный комплекс содержит систему управления перемещением оптического зонда видеоэндоскопа внутри железобетонных опор контактной сети с регистрацией координат предполагаемых дефектов и получение изображений таких дефектов с указанием их размеров и координат расположения. Видеоэндоскоп включает в себя гибкий оптический зонд с короткофокусным объективом и систему подсветки. Гибкий оптический зонд имеет возможность перемещения за счет применения шагового двигателя и поворота дистальной части в четырех направлениях, изображение через объектив попадает оптоэлектронный преобразователь, затем сигнал по кабелю передается в блок преобразования и выводится на монитор. Результатом является проведение панорамного сканирования внутренней части железобетонной опоры контактной сети, а для получения данных о состоянии опор используется управляющий персональный компьютер и алгоритм обработки полученных изображений с дефектами.

Предлагаемое техническое решение поясняется чертежом, где на рис. 2 представлена функциональная схема мехатронного комплекса для диагностирования коррозионного состояния железобетонной опоры контактной сети методом оптического сканирования ее внутренней поверхности.

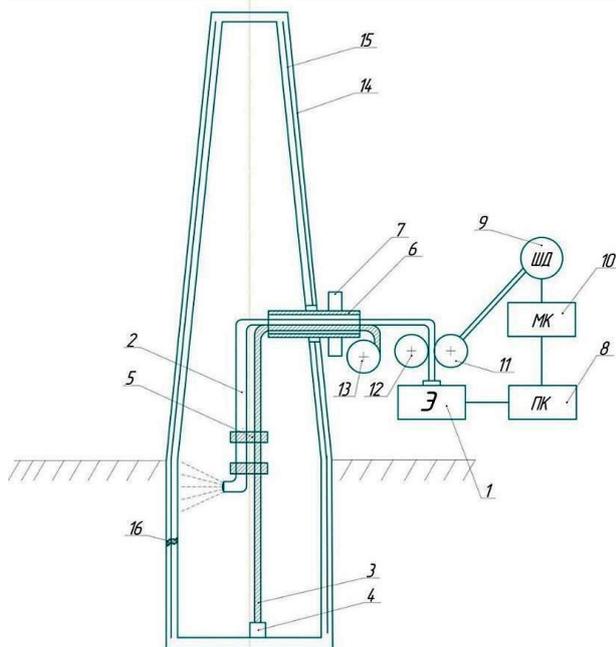


Рис. 2. Устройство диагностирования коррозионного состояния внутренней поверхности железобетонных опор контактной сети

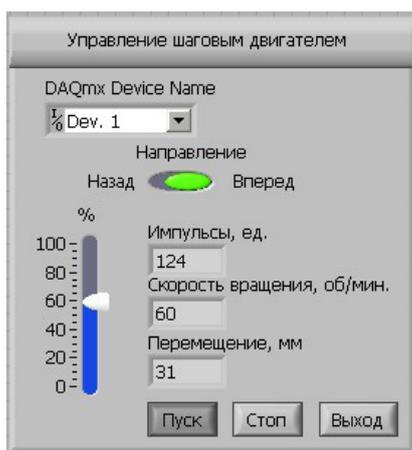


Рис. 3. Лицевая панель разработанного виртуального прибора

На рис. 2 изображены: видеоэндоскоп 1 с гибким оптическим зондом 2, направляющий трос 3 с грузом 4, фиксирующие кольца 5, направляющая трубка 6 с ограничительным кольцом 7, управляющий персональный компьютер 8, шаговый двигатель 9, микроконтроллер 10, приводной ролик 11, прижимной ролик 12, катушка направляющего троса 13.

Работа устройства диагностирования коррозионного состояния внутренней поверхности железобетонных опор контактной сети реализуется путем взаимодействия мехатронного комплекса с объектом диагностирования — железобетонной опорой контактной сети 14, установленной в грунт (рис. 2), со стальными арматурными стержнями 15 и возможным коррозионным дефектом 16 и формированием диагноза ее коррозионного состояния [8].

Взаимодействие мехатронного комплекса с объектом диагностирования осуществляется следующим образом. В технологическое отвер-

стие железобетонной опоры контактной сети 14 устанавливается направляющая трубка 6 до упора с ограничительным кольцом 7 таким образом, чтобы внутренний ее конец находился на центральной оси железобетонной опоры 14. Направляющий трос 3, одним концом закрепленный на катушке 13, пропускается во внутреннее отверстие направляющей трубки 6 таким образом, чтобы закрепленный к другому концу направляющего троса 3 груз 4 опустился до нижнего основания железобетонной опоры. Во внутреннее отверстие направляющей трубки 6 также помещается гибкий зонд 2 видеоэндоскопа 1, дистальный конец которого при помощи фиксирующих колец 5 соединяется с направляющим тросом 3, обеспечивая скользящий контакт, тем самым обеспечивая стабилизацию положения дистальной головки при видеосъемке.

Гибкий оптический зонд 2 видеоэндоскопа 1 позиционируется внутри железобетонной опоры в автоматическом режиме при помощи электропривода, содержащего приводной 11 и прижимной 12 ролики, шаговый двигатель 9, микроконтроллер 10 и управляющий персональный компьютер (ПК) 8. Программное обеспечение ПК 8 позволяет перемещать гибкий оптический зонд 2 видеоэндоскопа 1 вертикально вверх и вниз, регистрируя координаты перемещения. Перемещение и остановка осуществляется таким образом, чтобы обеспечить регистрацию непрерывного изображения внутренней поверхности от технологического отверстия, расположенного выше уровня земли до основания железобетонной опоры, расположенного ниже уровня земли. Набор изображений передается управляющим блоком видеоэндоскопа 1 в управляющий персональный компьютер 8.

В предлагаемом устройстве шаговый двигатель используется для вертикального перемещения гибкого зонда вниз и вверх для осуществления оптического контроля внутренней поверхности опор контактной сети.

Для реализации мехатронного комплекса был выбран четырехфазный шаговый двигатель типа 28BYJ-48 — бесколлекторный двигатель, вращение вала которого осуществляется дискретными шагами [9]. На роторе расположен постоянный магнит, а вокруг него расположены обмотки статора, при поочередной подаче импульсов на эти обмотки создается магнитное поле, которое отталкивает или притягивает магнитный вал, тем самым заставляя ротор двигателя вращаться. Такая конструкция позволяет с большой точностью управлять валом, относительно обмоток — угловой шаг на один импульс составляет 5,625 градуса.

Для макетирования работы шаговый двигатель подключался к автоматизированной станции NI Elvis II. Управляющая программа прототипа мехатронного комплекса для NI Elvis II была разработана в среде LabView [10]. Приложение, созданное в программной среде LabView, называется виртуальным прибором (Virtual Instrument) и состоит из двух частей:

- 1) лицевой панели, представляющей визуализацию интерфейса виртуального инструмента (рис. 3);
- 2) блочной диаграммы, представляющей программу виртуального инструмента (рис. 4).

На рис. 3 приведены следующие элементы управления:

1 — шкала управления частотой вращения шагового двигателя (для выбранного шагового двигателя максимальная частота равна 100 об/мин);

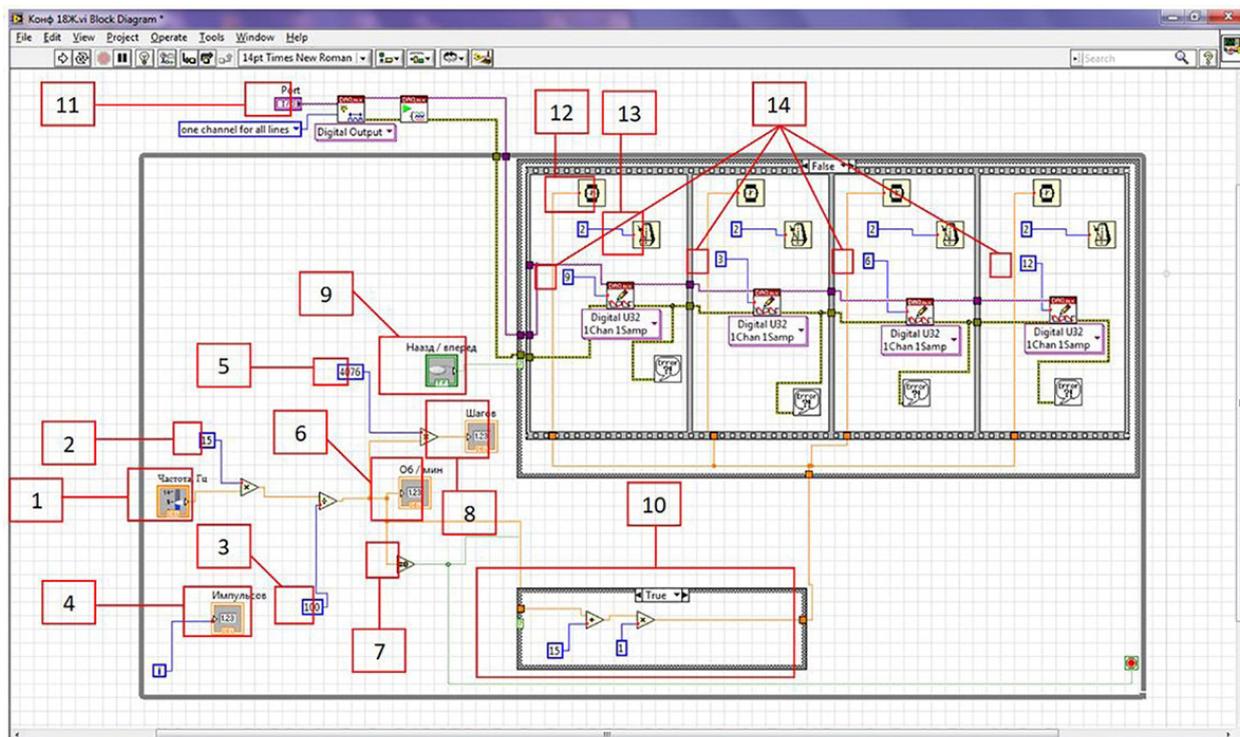


Рис. 4. Блок-диаграмма разработанного виртуального прибора

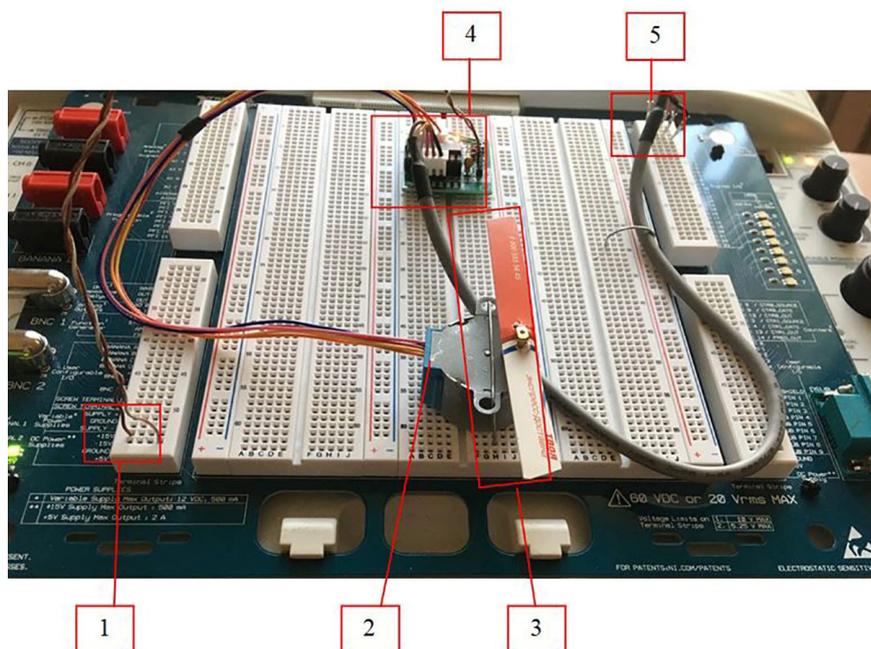


Рис. 5. Фотография прототипа устройства управления ШД

2 — тумблер управления вращения шагового двигателя (вперед — по часовой стрелке, назад — против часовой стрелки);

3 — поле, отображающее количество импульсов, выданных на двигатель, после запуска программы;

4 — поле, отображающее текущее значение перемещения оптического зонда;

5 — поле, показывающее текущее значение скорости вращения шагового двигателя;

6 — поле выбора порта подключения лабораторной станции NI Elvis II.

На рис. 4 приняты следующие обозначения:

1 — значение выбранной частоты следования тактовых импульсов;

2 — максимальное число оборотов в минуту;

3 — максимальная частота следования тактовых импульсов;

4 — отображение числа импульсов в форме;

5 — максимальное число шагов за один оборот;

6 — отображение числа оборотов в минуту;

7 — условие (если число равно 0, то программа прекращает работу; если число больше 0, то срабатывает заданное условие);

8 — отображение числа шагов;

Коды управления ШД

| Вращение вперед |    |    |    |    |
|-----------------|----|----|----|----|
| Цвет провода    | X1 | X2 | X3 | X4 |
| Белый           | 1  | 1  | 0  | 0  |
| Красный         | 0  | 1  | 1  | 0  |
| Коричневый      | 0  | 0  | 1  | 1  |
| Черный          | 1  | 0  | 0  | 1  |
| Вращение назад  |    |    |    |    |
| Цвет провода    | X1 | X2 | X3 | X4 |
| Белый           | 1  | 0  | 0  | 1  |
| Красный         | 0  | 0  | 1  | 1  |
| Коричневый      | 0  | 1  | 1  | 0  |
| Черный          | 1  | 1  | 0  | 0  |

9 — кнопка управления вращения шагового двигателя;

10 — блок проверки условия (правда / ложь);

11 — отображение порта подключения лабораторной установки NI Elvis II;

12 — блок управления скоростью вращения шагового двигателя;

13 — блок задержки в системе.

Фотография прототипа устройства управления ШД на основе NI Elvis II представлена на рис. 5.

На рис. 5 приняты следующие обозначения:

1 — выводы для подключения источника напряжения 5В и заземления; 2 — шаговый двигатель 28BYJ-48; 3 — указатель вращения; 4 — контроллер управления ШД; 5 — выводы для подключения к порту цифровых вводов-выводов DIO NI Elvis II.

В табл. 1 приведены данные для передачи двоичных кодов на порты цифровых вводов-выводов для вращения ШД по часовой стрелке (вперед) и против часовой стрелки (назад).

Разработанный мехатронный комплекс повышает достоверность диагностирования коррозионного состояния железобетонных опор контактной сети; снижает трудоемкость процесса получения данных и обработки результатов; получение документальных изображений результата диагностирования внутренних поверхностей железобетонной опоры контактной сети; обеспечивает стабилизацию положения оптической части [11, 12]. Конструкция устройства легко переносится на другие диагностируемые железобетонные опоры контактной сети и сохраняет панорамные изображения внутренней поверхности выше и ниже уровня земли.

#### Библиографический список

1. Кузнецов А. А., Кузьменко А. Ю. Результаты испытания переносного прибора контроля изоляторов контактной сети // Омский научный вестник. 2015. № 1 (137). С. 120–123.

2. Иванов Ф. М., Алексеев С. Н., Гусев Б. В. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты: моногр. / под ред. В. М. Москвина. Москва: Стройиздат, 1980. 536 с.

3. Бенин А. В., Семенов А. С., Семенов С. Г. Моделирование процесса разрушения элементов железобетонных конструкций под действием коррозии арматуры // Известия ПГУПС. 2010. № 2. С. 138–149.

4. Подольский В. И. Железобетонные опоры контактной сети. Конструкции, эксплуатация, диагностика // Труды ВНИИЖТ. Москва: Интекст, 2007. 152 с.

5. Котельников А. В., Кандаев В. А. Блуждающие токи и эксплуатационный контроль коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта: моногр. Москва: УМЦ ЖД, 2013. 552 с. ISBN 978-5-89035-627-7.

6. Брюхова А. С., Кузнецов А. А., Селиверстова И. В., Попов А. М., Лабутин Т. А., Зоров Н. Б. Оценка деградации железобетонных изделий по продуктам коррозии арматуры методом лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии // Журнал прикладной спектроскопии. 2020. № 87 (5). С. 719–723.

7. Кузнецов А. А., Брюхова А. С. Определение количественного содержания продуктов коррозии на поверхности железобетонных изделий // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 160–164. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-160-164.

8. Москвин В. М., Алексеев С. Н., Вербецкий Г. П. [и др.]. Трещины в железобетоне и коррозия арматуры / под ред. В. М. Москвина. Москва: Стройиздат, 1971. 144 с.

9. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления: пер. с англ. Москва: Академия, 1987. 200 с.

10. Евдокимов Ю. К., Линдваль В. Р., Щербаков Г. И. LabVIEW для радиоинженера: от виртуальной модели до реального прибора. Практическое руководство для работы в программной среде LabVIEW. Москва: ДМК Пресс, 2009. 400 с.

11. Агеев Е. В., Щербаков А. В., Алехин Ю. Г. Повышение информативности процесса диагностирования двигателей автомобилей за счет технической эндоскопии // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 1 (76). С. 18–26. DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-1-18-26.

12. Кандаев В. А., Леденёв М. А., Пономарев А. В. Программный модуль формирования панорамного изображения внутренней поверхности подземной части пустотелых железобетонных опор контактной сети и анализа распознанных неоднородностей // Известия Транссиба. 2017. № 1 (29). С. 99–105.

**КУЗНЕЦОВ Андрей Альбертович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника». SPIN-код: 5259-0531

AuthorID (РИНЦ): 358976  
AuthorID (SCOPUS): 56824984500  
Адрес для переписки: kuznetsova.a.omgups@gmail.com

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

SPIN-код: 8927-5050

AuthorID (РИНЦ): 514134

AuthorID (SCOPUS): 57206470876

Адрес для переписки: KuzmenkoAU@omgups.ru

**ЗВЕРЕВ Андрей Григорьевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теоретическая электротехника».

SPIN-код: 6697-9875

AuthorID (РИНЦ): 326066

Адрес для переписки: zverevag@yandex.ru  
**ВОЛЧАНИН Георгий Викторович**, аспирант кафедры «Теоретическая электротехника».

Адрес для переписки: vev\_7@bk.ru

#### Для цитирования

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.

Статья поступила в редакцию 21.07.2021 г.

© А. А. Кузнецов, А. В. Пономарев, А. Г. Зверев,  
Г. В. Волчанин