

## РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ШТЫРЬЕВЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

**В статье предложено изобретение, позволяющее диагностировать поврежденный изолятор, находящейся под рабочим напряжением воздушной линии электропередачи (ВЛЭП), с помощью контроля тока утечки. Изготовлен опытный образец, проведены эксперименты. Ток утечки, снимаемый с конструкции шунта, преобразуется в цифровой сигнал для обработки, передачи и дальнейшей обработки на диспетчерском пункте подстанции. Контролируемая величина тока утечки соответствует величине сопротивления изоляции изолятора.**

**Ключевые слова:** ток утечки, штырьевой изолятор, светодиод, переменное напряжение.

**Введение.** Среди задач повышения надежности энергосистемы одной из немаловажных является разработка способов и средств диагностики изоляторов под рабочим напряжением. В системах передачи электроэнергии высокого напряжения изоляторы являются незаменимым оборудованием, отвечающим за электрическую изоляцию. Причин выхода из строя изоляторов достаточно много: механические разрушения, сколы, воздействие окружающей среды (загрязнение, трещины и т. д.), длительное воздействие электрического поля и естественное старение. Приблизительный расчет отказа таков: например, ВЛЭП — 10 кВ длиной 10 км содержит около 150...200 опор и, соответственно, 450...600 изоляторов, вероятность электрического отказа не превышает 0,001 [1–4], т.е. приблизительно один из изоляторов повреждается в течение двух лет. Если учесть длины всех ЛЭП энергосистемы для разных уровней напряжения, то получаются довольно внушительные цифры как по количеству изоляторов, так и по частоте их выхода из строя. Для выявления их дефектов производят периодический осмотр, который является важной процедурой технического обслуживания.

Для эффективности диагностики и безопасности жизни людей большинство научных разработок, исследований и патентов направлены на создание устройств для выявления неисправных изоляторов, что является актуальным в настоящее время [5–7].

Известны различные методы выявления неисправных изоляторов [8–11].

1. Визуальный осмотр является основным методом диагностики выявления дефектных изоляторов. С помощью данного способа легко могут быть обнаружены коррозия, брызги краски на изоляторах и другие формы тяжелого загрязнения. Этот способ легкий и не затратный, но некоторые дефекты

не видно даже с близкого расстояния, и тогда применяют разную технику. Однако недостатком такого способа является обход всех электроустановок с изоляторами.

2. Измерения тока утечки. Метод основан по принципу, что при загрязнении, поверхностное сопротивление изолятора уменьшается, это позволяет протекать току утечки через тело изолятора и по его поверхности. Характеристиками тока утечки являются величина тока, содержание гармоник, частота повторения импульсов. По ним определяют характер и серьезность ухудшения изоляции. Недостаток данного метода в том, что техника не обнаруживает трещины и пустоты [12].

3. Измерение сопротивления изоляции. Рабочие изоляторы обладают высоким сопротивлением (порядка несколько десятков...сотен ТераОм), что позволяет использовать при диагностике терраомметры. Если при наблюдении изолятор имеет низкий импеданс, то он считается дефектным. Полученные показания могут обладать высокой погрешностью, т.к. сопротивление измерения изолятора зависят от атмосферных условий, чаще всего от загрязнения и влажности. Недостатком такого метода является проведение измерения при отключенном напряжении.

4. Картирование электрического поля включает в себя измерение распределения электрического поля на поверхности изолятора или вдоль ряда изоляторов. Затем полученное изображение сравнивают с картиной, отражающей бездефектные условия. Недостатком такого метода является, как и в первом, — обход всех электроустановок с изоляторами.

5. Инфракрасное сканирование. Увеличение тока утечки в изоляторе проявляется повышенным выделением тепла в соответствии с законом Джо-

уля — Ленца. В результате увеличенное выделение тепла можно наблюдать в спектре инфракрасного света. Это видится с помощью тепловизоров и пирометров, которые идентифицируют и определяют зону дефекта. Нормальные изоляторы приобретают температуру окружающей среды, их называют нулевыми, остальные разделяют на исправные и дефектные. Разница температур между исправным и поврежденным изоляторами составляет от 0,3–0,5 °С и более. Недостаток такого способа — измерения могут быть неточные, т.к. чувствительность техники зависит от времени года, погоды и освещения, которые могут быть весьма динамичными [13].

6. Существует [14] система контроля с использованием мобильного робота, который движется по линии электропередачи. Он имеет три микрофона, с помощью которых улавливает звуковой сигнал, чтобы определить положение неисправных изоляторов. Микрофоны расположены в одну линию с фиксированным интервалом, которые получают частичный звук дуги в разное время. Частичные разряды короны вырабатывают шумовые звуковые сигналы. Поскольку между микрофонами существует интервал, то звуковой сигнал поступает на каждый микрофон с определенной разницей по времени. С помощью этой разницы времени прибытия звукового сигнала распознают расстояние и ориентацию неисправного изолятора. Абсолютные координаты неисправного устройства могут быть определены по относительным координатам устройства мобильного робота. Микрофонные решетки позволяют фильтровать шумы от ветра, пения птиц. Недостаток способа заключается в обработке отраженного сигнала, который ухудшает достоверность данных. Но использование мобильного робота, который может выполнять систему контроля в реальное время, позволяет уменьшить затраты энергокомпаний и обезопасить работу бригад.

7. Оптический контроль. Суть способа заключается в обнаружении ультрафиолетового излучения (УФ), которое возникает при короне и поверхностном частичном разряде (ПЧР). Длина электромагнитной волны составляет от 280 нм до 400 нм. Известен электронно-оптический дефектоскоп «Филин-6», способный определять степень загрязнения изоляторов, наличие микротрещин, характеристики и зависимость от напряжения ПЧР и коронных разрядов. Также известны зарубежные аналоги: двухспектральная солнечно-слепая система DayCog SUPERB OD|XD, которую выпускает израильская фирма ORNIL; Cogo — Cam (ЮАР) [15–17]. Однако такой метод позволяет определить поверхностные разряды при перенапряжениях и с помощью него невозможно выявить утечку тока по телу изолятора.

8. Испытание высоким напряжением. Способ заключается в подаче высокого потенциала через изолятор. При наличии дефекта, изолятор пробивается. Это единственный метод, который имеет 100 % эффективность в выявлении всех дефектных изоляторов, в том числе тех, которые выдержали нормальное рабочее напряжение. Испытательные устройства высокого напряжения могут быть конденсаторными. Конструкции разряда обеспечивают однонаправленное или затухающее синусоидальное испытательное напряжение. Напряжение пробоя на поверхности изолятора определяет верхний предел испытательного напряжения. Недостатком такого способа является раздельное испытание каждого

изолятора с его демонтажом или его отключением от сети, путем снятия проводника.

9. Обнаружение или измерение потенциала. Суть способа заключается в том, что потенциал через неисправные изоляторы будет отличаться от здоровых из них. Но осуществлять такое измерение под напряжением довольно опасно и тоже трудоемко.

10. Обнаружение дефектов ультразвуком. Ультразвуковая диагностика заключается в обнаружении импульсного эха либо акустической эмиссии. Акустические волны распространяются в материале через молекулярное взаимодействие, и, следовательно, любой дефект, такой как трещины и пустоты в материале, приводят к характерным изменениям: ослабление сигнала, скорости и направления волны. Электрические разряды в дефектах изолятора создают акустические волны, которые могут быть обнаружены датчиками, передающими информацию о природе дефектов [18, 19]. Преимущества заключаются в том, что в любое время под рабочим напряжением возможно дистанционно снимать показания. Но метод используют как дополнительный [20].

**Постановка задачи.** В [5] представлено устройство, включающее оптический индикатор, который реагирует на распределение электрического поля и потенциала вдоль изолятора. При дефектном изоляторе напряженность электрического поля возрастает, на схеме появляется напряжение — достаточное, чтобы компаратор сработал и засветился светодиод. В другом предложенном варианте [5] в устройстве на основе диодисторов используется два светодиода — зеленый и красный. В нормальном режиме светится только зеленый, при наличии дефекта в изоляторе загорается красный светодиод, зеленый гаснет.

Недостаток данного устройства заключается в отсутствии гальванической связи между диагностическим устройством (ДУ) и токоведущими проводниками.

В [6] представлено устройство, позволяющее дистанционно определять рабочее состояние высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации. Устройство состоит из двух приемников: электромагнитных и акустических сигналов; аналого-цифрового преобразователя с модулем WNPA; сам модуль WNPA (микроконтроллерное устройство с радиопередатчиком) с USB интерфейсом и персональный компьютер. Данное устройство позво-

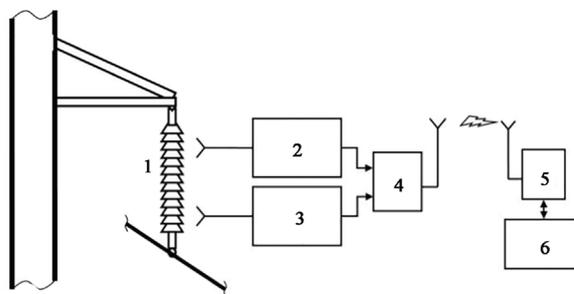


Рис. 1. Блок-схема измерительного устройства:

- 1 — изолятор высокого напряжения;
- 2 — приемник электромагнитных сигналов;
- 3 — приемник акустических сигналов;
- 4 — аналого-цифровой преобразователь с модулем WNPA;
- 5 — модуль WNPA с USB интерфейсом;
- 6 — персональный компьютер

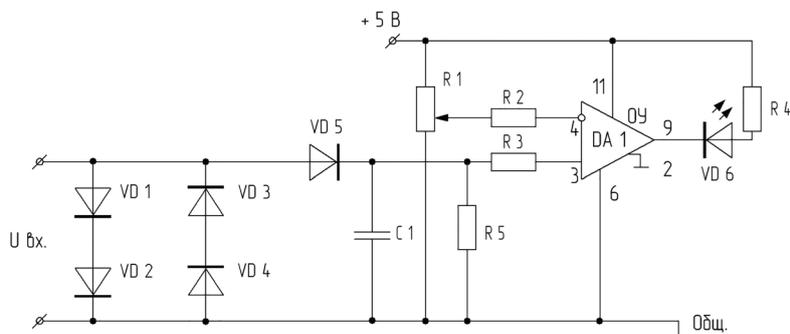


Рис. 2. Схема предлагаемого диагностического устройства

ляет зафиксировать набор амплитудно-фазовых характеристик частичных разрядов (ЧР), которые сравниваются с эталонными (амплитудно-фазовые характеристики частичных разрядов, снятые с исправных изоляторов). На рис. 1 показана блок-схема измерительного устройства.

Недостаток данного устройства заключается в необходимости наличия базы хранения с записанными эталонными характеристиками, т. к. импульсный сигнал для (бездефектного) высоковольтного изолятора должен быть зафиксирован для каждого используемого типа изолятора. Так же из-за различия порядков скорости распространения электромагнитных и акустических импульсов программа блока синхронизации должна учитывать расстояние между дефектом и датчиками и синхронизировать их с каждым конкретным фазовым интервалом, что увеличивает время обработки информации.

Таким образом, необходимо разработать диагностическое устройство для штырьевых изоляторов, которое будет передавать информацию в реальном времени и не будет зависеть от погодных условий.

**Устройство и принцип работы диагностического устройства.** Диагностическое устройство устанавливается на заземленной траверсе и снимает падение напряжения с шунта [21]. В нормальном режиме, когда изолятор исправен и обладает высоким сопротивлением, ток утечки небольшой, в пределах нормы. Этот ток протекает от провода или шины ЛЭП через изолятор и шунт к заземленной траверсе. На шунте возникает падение напряжения в соответствии с законом Ома, которое поступает на диагностическое устройство. Так как ток утечки мал, диагностическое устройство не передает оператору сигнал. В режиме повреждения изолятора его сопротивление снижается. Ток утечки увеличивается и достигает критической величины, а пропорционально ему увеличивается падение напряжения на шунте, которое контролируется диагностическим устройством. Так как напряжение на шунте будет соответствовать аварийному значению, то оно будет зафиксировано диагностическим устройством, устройство срабатывает и посылает сигнал оператору. Это означает, что на воздушной линии электропередачи диагностируется недопустимо высокая утечка напряжения, изолятор поврежден и требует замены.

Авторы предлагают схему диагностического устройства (рис. 2), на вход которой с шунта подается сигнал на диодный мост (VD1-VD4), необходимый для защиты устройства; выпрямительный диод VD5 и конденсатор C1 для сглаживания однополупериодного сигнала. Далее выпрямленный сигнал  $U_{вх}$  поступает на неинвертирующий вход компара-



Рис. 3. Экспериментальная установка: 1 — установка АИД-70М; 2 — изолятор ШФ-10Г; 3 — высокоомный шунт; 4 — диагностическое устройство; 5 — вольтметр

тора DA1 через резистор R3. На инвертирующий вход компаратора DA1 через резистор R2 подается сигнал с делителя напряжения резистора R1, который формирует опорный сигнал  $U_{оп}$  уставки срабатывания. При превышении  $U_{вх} > U_{оп}$  компаратор DA1 срабатывает и через токоограничивающий резистор R4 на светодиод VD1 подается напряжение, он светится. Питание устройства в экспериментальном образце идет от батареи 4,5 В.

**Экспериментальные исследования.** Представленная схема (рис. 2) была экспериментально проверена в лаборатории. Для проведения эксперимента был использован источник переменного напряжения АИД-70М, штырьевой изолятор ШФ-10Г, высокоомный шунт  $R = 17,9$  кОм, диагностическое устройство, вольтметр и провода с электрическими зажимами (рис. 3).

С помощью установки АИД-70М подавалось переменное напряжение от 0 до 10 кВ. Изолятор ШФ-10Г, подключенный последовательно с АИД-70М, заранее был дефектным и был расположен на шунте. Вольтметр показывал входное переменное напряжение, которое поступало на диагностическое устройство. В момент подачи напряжения 10 кВ на установку АИД-70М, вольтметр зафиксировал напряжение  $U_v = 0,2$  В и диагностическое устройство сработало, загорелся светодиод (рис. 4).

Расчет протекающего тока утечки через дефектный изолятор при сработавшем ДУ (1):

$$I_{унак} = \frac{U_v}{R} = \frac{0,2}{17900} = 1,117 \cdot 10^{-5} \text{ А.} \quad (1)$$



Рис. 4. Рабочее состояние диагностического устройства при поврежденном изоляторе

**Обсуждение результатов.** В процессе проведения эксперимента на входе ДУ зафиксировано напряжение тока утечки повреждённого изолятора. Таким образом, доказана работоспособность экспериментального образца и его пригодность к внедрению.

**Заключение.** В работе произведен обзор существующих диагностических устройств, используемых для диагностики и мониторинга изоляторов ВЛЭП, и выявлены их недостатки. Авторами предложена схема диагностического устройства, описан её принцип действия и проведены эксперименты с опытным образцом. Представленное в статье диагностическое устройство ведет контроль тока утечки изолятора и, соответственно, за величиной сопротивления изоляции.

С помощью проведённого эксперимента показана работоспособность разработанного устройства.

В перспективе устройство будет элементом датчика тока утечки высоковольтного изолятора в системе диагностирования состояния ВЛЭП на средний класс напряжения 6–35 кВ.

#### Библиографический список

1. Овсянников А., Тарасов А., Яншин Э. Тарельчатые изоляторы на воздушных линиях // Новости электротехники. 2010. № 6 (66). URL: <http://news.elteh.ru/arh/2010/66/09.php> (дата обращения: 14.04.2021).
2. ГОСТ 6490-2017. Изоляторы линейные подвесные тарельчатые. Общие технические условия (ИУС 3-2018). Введ. 2018–09–01. Москва: Стандартинформ, 2018. 31 с.
3. Новиков В. П., Скобейдо А. И. Исследование механической прочности подвесных изоляторов из закаленного стекла в зависимости от длительности воздействия нагрузки // Известия НИИПТ. 1970. № 16. С. 263–266.
4. Скобейдо А. И., Тюрин Э. А. Оценки показателей надежности и изменения механической прочности изоляторов из закаленного стекла по опыту их эксплуатации // Изоляция воздушных линий электропередачи 110–1150 кВ: сб. науч. тр. НИИПТ. Ленинград: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1989. С. 22–28.
5. Балобанов Р. Н., Зарипов Д. К., Насибуллин Р. А. [и др.]. Устройство оптической индикации дефекта высоковольтной изолирующей конструкции // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19, № 3-4. С. 119–125.
6. Ivanov D. A., Golenishchev-Kutuzov A. V., Yaroslavsky D. A. [et al.]. Portable complex for remote control of high-voltage

insulators using wireless data collection and transmission module // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Vol. 13, № 6. P. 2358–2362.

7. Несенюк Т. А. Непрерывная диагностика опорно-штыревых изоляторов на воздушных линиях 6–10 кВ // Энергобезопасность и энергосбережение. 2013. № 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nepreryvnaya-diagnostika-oporno-shytyrevykh-izolyatorov-na-vozdushnyh-liniyah-6-10-kv> (дата обращения: 01.04.2021).

8. Yaowen L. Analysis of the detection method of insulators deterioration based on optical electric field sensors // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 714, № 4. 042047. DOI: 10.1088/1755-1315/714/4/042047.

9. Liu X., Miao X., Jiang H. [et al.]. Box-Point Detector: A Diagnosis Method for Insulator Faults in Power Lines Using Aerial Images and Convolutional Neural Networks // IEEE Transactions on Power Delivery. 2021. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.3048935.

10. Rahman E. U. [et al.]. Autonomous Vision-Based Primary Distribution Systems Porcelain Insulators Inspection Using UAVs // Sensors. 2021. Vol. 21 (3). 974. DOI: 10.3390/s21030974.

11. Tan J. Automatic Insulator Detection for Power Line Using Aerial Images Powered by Convolutional Neural Networks // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1748 (4). 042012. DOI:10.1088/1742-6596/1748/4/042012.

12. Плешков П. Г., Котыш А. И. Диагностика состояния опорных изоляторов 10–35 кВ по их токам утечки. 2006. URL: <http://pnpbolid.com/wp-content/uploads/2019/10/iv-conference-2006-07.pdf> (дата обращения: 01.02.2021).

13. Wu Y., Yao J., Li T. [et al.]. Application of Image Processing Techniques in Infrared Detection of Faulty Insulators // Chinese Conference on Pattern Recognition. Springer, Berlin, Heidelberg. 2014. С. 189–198. DOI: 10.1007/978-3-662-45643-9\_20.

14. Ha H., Han S., Lee J. Fault detection on transmission lines using a microphone array and an infrared thermal imaging camera // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2011. Vol. 61, Issue 1. P. 267–275. DOI: 10.1109/TIM.2011.2159322.

15. Электронно-оптический дефектоскоп «ФИЛИН-6». URL: <http://www.ndtural.ru/razdel.html?gc=4&ci=57&ir=8390> (дата обращения: 14.04.2021).

16. Range of products / Ofil. URL: <http://www.ofilsystems.com/products/index.html> (дата обращения: 14.03.2021).

17. Ультрафиолетовая камера (дефектоскоп) COROCAM 8. URL: [http://www.corocam-uv.ru/cam\\_10.html](http://www.corocam-uv.ru/cam_10.html) (дата обращения: 14.03.2021).

18. Nyamupangedengu C., Luhlanga L. P., Letlape T. Acoustic and HF detection of defects on porcelain pin insulators // 2007 IEEE Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa – PowerAfrica. 2007. P. 1–5. DOI:10.1109/PESAFR.2007.4498111

19. Samaitis V. [et al.]. Detection and Localization of Partial Discharge in Connectors of Air Power Lines by Means of Ultrasonic Measurements and Artificial Intelligence Models // Sensors. 2021. Vol. 21 (1). 20. DOI: 10.3390/s21010020.

20. Рейх Е. Н., Сыченко В. Г., Ким Е. Д. Анализ методов и средств диагностирования для оценки состояния изоляторов контактной сети // Электрификация транспорта. 2012. № 4. С. 54–60.

21. Пат. 201395 Российская Федерация, МПК Н 01 С 3/00, G 01 R 19/00. Конструкция шунта для диагностики подвесных изоляторов воздушной линии электропередач / Терещенко Н. А., Мирошник В. Ю., Поляков Д. А., Никитин К. И. № 2020134446; заявл. 21.10.2020; опубл. 14.12.2020., Бюл. № 35.

**ТЕРЕЩЕНКО Надежда Андреевна**, аспирант кафедры «Теоретическая и общая электротехника». SPIN-код: 4017-2286, AuthorID (РИНЦ): 947723 AuthorID (SCOPUS): 57216615006 Адрес для переписки: nadezhda.tereshchenko@mail.ru

**МИРОШНИК Вадим Юрьевич**, аспирант кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

SPIN-код: 7967-0306

AuthorID (РИНЦ): 824259

Адрес для переписки: miroshnikvad@gmail.com

**ХОЛМОВ Михаил Александрович**, студент гр.

Э-175 Энергетического института.

SPIN-код: 2561-3270

AuthorID (РИНЦ): 1087396

Адрес для переписки: misha97h@gmail.com

**НИКИТИН Константин Иванович**, доктор технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая и общая электротехника».

SPIN-код: 3733-8763

AuthorID (РИНЦ): 641865

AuthorID (SCOPUS): 56825489500

Адрес для переписки: nki@ngs.ru

**КОВРИЖИН Борис Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

AuthorID (РИНЦ): 684447

Адрес для переписки: boriskovrizhin@mail.ru

#### Для цитирования

Терещенко Н. А., Мирошник В. Ю., Холмов М. А., Никитин К. И., Коврижин Б. Н. Разработка диагностического устройства штырьевых изоляторов // Омский научный вестник. 2021. № 3 (177). С. 70–74. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-177-70-74.

Статья поступила в редакцию 14.04.2021 г.

© Н. А. Терещенко, В. Ю. Мирошник, М. А. Холмов,  
К. И. Никитин, Б. Н. Коврижин