

Capacitive Sensor for Monitoring the Condition of Suspended High-Voltage Insulation

Andreenkov E.S., Shunaev S.A.

Smolensk branch of National Research University "MPEI"

Smolensk, Russian Federation

Abstract. The purpose of the work is to develop the design of a sensor for monitoring the condition of high-voltage power lines suspended insulation. To achieve this goal, a diagnostic criterion was selected, the operating principle and design of the insulation monitoring sensor were determined. As a diagnostic criterion is considered a changing of voltage on the insulator plate due to a change in the distribution of electrical potential on the insulators, caused of damage in the insulators string. For the diagnostic system implementation was adopted a sensor based on a capacitive divider. The calculations confirm the possibility of registration a damaged element in a insulators string by getting of voltage change at the sensors output. The calculation results were verified by modeling in the Multisim software. The parameters of the sensor were calculated, correctness of it is confirmed by the results of laboratory measurements of the new insulators plate capacitances, as well as insulators destroyed as a result of operation. The most important results of the research are the selection of the optimal diagnostic criterion and researching of the proposed design sensor effectiveness for assessing the suspended insulation condition. The significance of the results obtained lies in the fact that the developed design of a sensor allows one to obtain prompt information about the presence of damage in the insulation. The use of the proposed sensor design will make possible creation a continuous diagnostic system and identify damage at an early stage, which will ensure timely maintenance.

Keywords: insulator, diagnostics, capacitive divider, capacitor, sensor.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.1-61.06>

UDC: 681.586.37

Senzor capacitiv pentru monitorizarea stării izolației suspendate de înaltă tensiune

Andreenkov E.S., Șunaev S.A.

Filiala a instituției de învățământ superior bugetar de stat federal „Universitatea Națională de Cercetare „MPEI” din Smolensk, or. Smolensk, Federația Rusă

Rezumat. Scopul lucrării este de a dezvolta proiectarea unui senzor pentru monitorizarea stării de izolație suspendată a liniilor electrice de înaltă tensiune. Pentru atingerea acestui scop, au fost rezolvate următoarele sarcini: a fost selectat un criteriu de diagnosticare a stării liniilor de alimentare, s-au determinat principiul de funcționare și proiectarea senzorului de monitorizare a izolației. Acest studiu propune o metodă de monitorizare continuă a stării izolației suspendate de înaltă tensiune folosind exemplul unei linii electrice de 110 kV, a cărei componentă cheie este un senzor de monitorizare a izolației. Criteriul de diagnostic este o modificare a tensiunii pe placa izolatoare din cauza unei modificări a distribuției potențialului electric pe izolatoare, în prezența deteriorării ghirlandei. Sunt formulate cerințele de bază pentru un senzor de monitorizare a tensiunii online, pe baza cărora se adoptă un senzor bazat pe un divizor capacitiv pentru implementarea unui sistem de diagnosticare. Designul și parametrii senzorului sunt selectați folosind baza elementului existent. Cele mai importante rezultate ale studiului sunt selectarea criteriului optim de diagnosticare, care face posibilă implementarea unui senzor de monitorizare a izolației bazat pe un divizor capacitiv și un studiu al eficienței senzorului din proiectul propus pentru evaluarea stării suspendate. izolație. Semnificația rezultatelor obținute este că proiectarea dezvoltată a unui senzor pentru monitorizarea stării izolației suspendate va face posibilă crearea unui sistem de diagnosticare continuă a izolației de înaltă tensiune a liniilor electrice și identificarea deteriorării într-un stadiu incipient, care va asigura întreținerea și repararea în timp util.

Cuvinte-cheie: izolator, diagnosticare, divizor capacitiv, condensator, senzor.

Ёмкостной датчик контроля состояния подвешенной высоковольтной изоляции

Андреев Е.С., Шунаев С.А.

Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске

Смоленск, Российская Федерация

Аннотация. Целью работы является разработка конструкции датчика контроля состояния подвешенной изоляции высоковольтных линий электропередачи. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: был выбран критерий диагностики состояния ЛЭП, определен принцип действия и конструктивное исполнение датчика контроля изоляции. В данном исследовании предлагается метод

непрерывного контроля состояния подвесной высоковольтной изоляции на примере ЛЭП 110 kV, ключевым компонентом которого является датчик контроля изоляции. Критерием диагностики является изменение напряжения на тарелке изолятора вследствие изменения распределения электрического потенциала на изоляторах, при наличии повреждения в гирлянде. Сформулированы основные требования к датчику оперативного контроля напряжения, на основании которых для реализации системы диагностики принимается датчик на основе емкостного делителя. Производится выбор конструктивного исполнения и параметров датчика с использованием существующей элементной базы. Расчетами подтверждается возможность регистрации появления поврежденного элемента в гирлянде по изменению напряжения на выходе датчика предлагаемой конструкции. Результаты расчетов верифицированы на компьютерной модели в программной среде Multisim. Корректность, принятых при расчетах, величин емкостей подтверждается результатами лабораторных измерений емкостей новых стеклянных тарельчатых изоляторов, а также изоляторов, разрушенных в результате эксплуатации. Наиболее важными результатами исследования являются выбор оптимального критерия диагностики, позволяющего реализовать датчик контроля изоляции на базе емкостного делителя и исследования эффективности датчика предлагаемой конструкции для оценки состояния подвесной изоляции. Значимость полученных результатов состоит в том, что разработанная конструкция датчика контроля состояния подвесной изоляции позволит создать систему непрерывной диагностики высоковольтной изоляции ЛЭП и выявлять повреждения на ранней стадии, что обеспечит своевременность обслуживания и ремонта.

Ключевые слова: изолятор, диагностика, емкостной делитель, конденсатор, датчик.

ВВЕДЕНИЕ

Среди существующих в мировой практике методов диагностики и испытания подвесной изоляции можно выделить традиционные методы, регламентированные руководящими документами, так и прочие методы, описываемые в научной литературе.

Наиболее достоверно состояние изоляторов можно определить путем измерения параметров на отключенном оборудовании. К таким методам относятся квалификационные (приемочные) и периодические испытания изоляции после изготовления в соответствии с регламентами [1, 2].

К основным методам обнаружения дефектов изоляции ЛЭП, не требующим отключения, относятся методы визуального контроля, которые могут проводиться как непосредственно оперативным персоналом [3], так и с помощью беспилотных летательных аппаратов [4, 5]. При этом во всех вышеописанных методах контроль текущего состояния изоляции не предусматривается.

Ввиду особой актуальности и значимости вопроса в последнее время начали предлагаться методы *on-line* диагностики параметров подвесной изоляции. А в качестве критериев диагностики данные методы могут использовать различные параметры изоляции.

Одним из распространенных критериев диагностики является ток утечки, который позволяет вести оценку состояния изолятора под рабочим напряжением в режиме реального времени. Когда изолятор загрязняется или теряет изоляционные

свойства, его сопротивление уменьшается, что приводит к увеличению тока утечки. Системы непрерывной диагностики на основе данного критерия описываются в [6, 7]. Недостатком таких методов является чувствительность тока утечки к увлажнению изоляции, и влияние погодных условий на достоверность диагностики [8].

Увеличение токов утечки, приводит к интенсивному тепловыделению, поэтому существуют рекомендации и по осуществлению тепловизионного контроля [9]. Факт выделения тепла можно увидеть в инфракрасном световом спектре. Но измерения могут быть неточными. Чувствительность методики зависит от времени года, погоды и освещения [9].

Одним из наиболее эффективных инструментов диагностики изоляции является метод диагностики частичных разрядов (ЧР). Однако этот метод может быть сложным для корректной обработки полученных результатов и требует высокого уровня квалификации персонала или программного обеспечения, обеспечивающего анализ в автоматическом режиме. Кроме того, оборудование для диагностики ЧР имеет более высокую стоимость [11-13].

В мировой практике находят применение ультразвуковые методы диагностики изоляторов. Любой дефект, например, трещина в материале, вызывает изменение ультразвукового сигнала, изменяя его скорость и направление волны. Но на достоверность результата могут повлиять помехи из-за воздействия электромагнитных

полей. Этот метод обычно используется в качестве дополнительного [14], [15].

Другим распространённым в мировой практике инструментом диагностики состояния ЛЭП являются емкостные датчики напряжения и других параметров [16, 17]. Преимуществом таких датчиков является простота конструкции, что обеспечивает их надежность. Емкостные датчики используются в том числе и для диагностики изоляции, например посредством регистрации ЧР [11]. Но, как упоминалось выше, обработка и интерпретация результатов измерения ЧР является достаточно сложной. Другим способом диагностики изоляции с помощью емкостных датчиков является измерение напряженности электрического поля [18]. Однако данный метод описывается только для диагностики проходных изоляторов.

В данной работе для диагностики изоляции ЛЭП предлагается использовать емкостные датчики, а в качестве критерия диагностики – падение напряжения, что обеспечивает простоту интерпретации результатов.

Такой метод диагностики рассматривается в наших работах, опубликованных в 2017–2022 годах. Предлагается оснастить каждую гирлянду изоляторов датчиком напряжения, и на основании данных об измеряемом напряжении делать вывод о состоянии изоляции. При этом все датчики по беспроводному каналу связываются с центром сбора данных для реализации непрерывной удаленной диагностики.

Расположение датчика напряжения предусматривалось непосредственно на фазном проводе, что делало реализацию датчика напряжения затруднительной. В настоящей работе предлагается модернизация нашего метода за счет расположения емкостного датчика напряжения на заземлённой траверсе опоры.

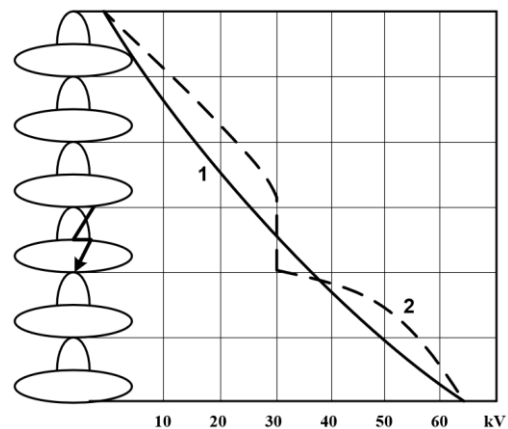
1. КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПОДВЕСНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

В настоящее время на ЛЭП применяют изоляцию из фарфора, стекла и полимерных материалов. При этом значительная часть высоковольтной линейной изоляции выполняется гирляндами тарельчатых стеклянных изоляторов в силу ряда неоспоримых её преимуществ.

Причины повреждения изоляторов бывают различны: внутренний и поверхностный пробой; повреждение при перекрытии дугой;

растрескивание и коррозия. Выйти из строя при этом могут только отдельно взятые тарельчатые изоляторы, что не приведет к немедленному отключению линии. Однако, падение напряжения на каждом из оставшихся изоляторов значительно возрастет, что повысит риск выхода их из строя и полного перекрытия изоляции с отключением линии. Чтобы избежать таких отключений необходимо наличие непрерывного контроля наличия поврежденных изоляторов.

Как известно [19] напряжение вдоль гирлянды распределяется неравномерно (кривая 1 на рис.1). При чистых и сухих изоляторах на каждый из них приходится падение напряжения, определяемое положением в гирлянде и уровнем фазного напряжения линии. Наибольшее падение приходится на изоляторы ближайшие к проводу. При появлении в гирлянде изолятора, утратившего свои изоляционные свойства, перераспределение напряжения неизбежно меняется (кривая 2 на рис. 1). Поэтому контроль падения напряжения на изоляторах позволяет судить об исправности всей гирлянды.



1 – все изоляторы исправны; 2 – при наличии поврежденного изолятора
(1 – all insulators are operational; 2 – in the presence of a damaged insulator)

Рис. 1. Кривая распределения потенциала вдоль высоковольтного изолятора.¹

Контроль напряжения на изоляторе высоковольтной гирлянды представляет собой сложную задачу. На начальном этапе решения данной задачи необходимо определить способ контроля (прямой или косвенный) а затем выбрать оптимальный тип чувствительного элемента.

В данной работе предусматривается реализация прямого способа измерения напряжения. Такой способ подразумевает

¹ Appendix 1

использование в качестве чувствительного элемента датчика напряжения.

Учитывая специфичность расположения датчика, к нему были сформированы следующие требования:

- чувствительность работы;
- точность измерений;
- способность выдерживать суровые климатические условия и высокие уровни электромагнитных полей
- простота интерпретации выходного сигнала;
- компактность и экономичность исполнения.

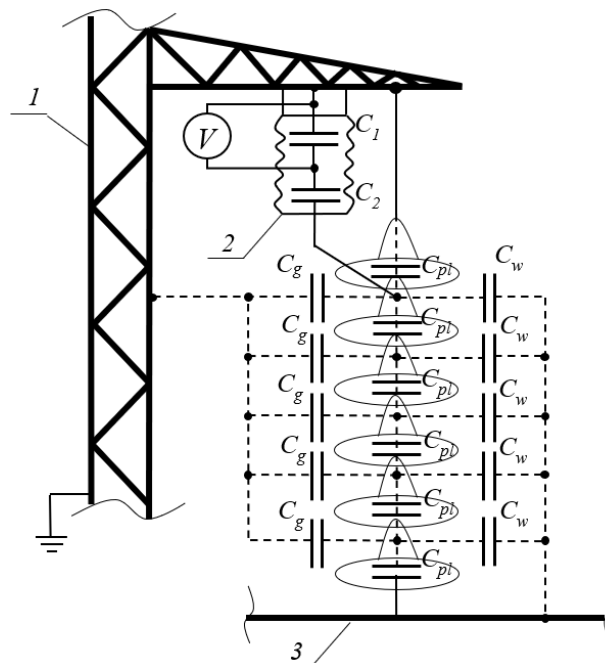
По результатам сравнительного анализа разных типов датчиков для использования в предлагаемой системе мониторинга и контроля изоляции были выбраны датчики напряжения на основе емкостного делителя.

Принцип диагностики поврежденного изолятора с помощью емкостного датчика следующий. Так как каждая тарелка изолятора обладает определенной емкостью, появление поврежденного изолятора приводит к перераспределению потенциала вдоль гирлянды, как было показано выше. Изменение распределения потенциала

фиксируется измерением падения напряжения на одной тарелке изолятора с помощью емкостного делителя как увеличение напряжения на его низковольтном плече.

II. ВЫБОР КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДАТЧИКА НАПРЯЖЕНИЯ

С технологической точки зрения размещение низковольтного плеча будет проще со стороны нулевого потенциала, так как это потребует всего одного проводника на высоком потенциале, а вторым будет являться заземлённая траверса опоры. Поэтому в качестве измеряемого напряжения удобно использовать падение напряжения на верхней тарелке гирлянды. Принципиальная схема измерения напряжения согласно предлагаемой концепции контроля изоляции приведена на рис. 2. Подразумевается установка на заземленной траверсе опоры датчика напряжения в виде емкостного делителя с емкостями C_2 высоковольтного плеча и C_1 низковольтного плеча.



C_{pl} – емкости тарелок изолятора; C_w – паразитные емкости относительно токоведущей части; C_g – паразитные емкости относительно земли
 (C_{pl} – capacity of insulator plates; C_w – parasitic capacitances relative to the current-carrying part; C_g – parasitic capacitances relative to ground)

Рис. 2. Принципиальная схема измерения падения напряжения на тарелке изолятора.²

Конструктивно датчик напряжения состоит из двух последовательно соединенных стандартных высоковольтных керамических конденсаторов типа КВИ-3, которые помещаются в изоляционную оболочку (фарфоровую или из литого компаунда).

Схематичное изображение датчика представлено на рис. 3. Сигнал с выхода низковольтного плеча поступает на вход аналогово-цифрового преобразователя (АЦП), где обеспечивается предварительная обработка сигнала и преобразование его в цифровой формат.

Радиоканал передачи данных обеспечивает беспроводную передачу данных в аналитический центр. Расположение датчика предусматривается на заземленной траверсе опоры ЛЭП вблизи контролируемого изолятора.

Для системы диагностики гирлянды изоляторов ЛЭП 110кВ, состоящей из шести тарелок, был произведен расчет емкостного делителя датчика контроля напряжения. При этом были рассчитаны емкости высоковольтного и низковольтного плеч (C_1 и C_2). Схема замещения, при условии чистых и сухих изоляторов в гирлянде, принимает вид, показанный на рис. 4.

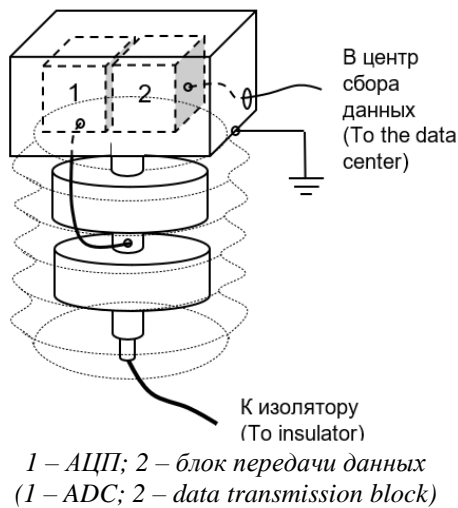


Рис. 3. Конструктивная схема датчика напряжения системы контроля изоляции.³

Для определения значения входного напряжения емкостного делителя (потенциал точки «б» на рис. 6) необходимо найти распределение напряжения вдоль всей гирлянды.

Дифференциальное уравнение, описывающее распределение напряжения вдоль представленной схемы:

$$\frac{d^2 U_x}{dx^2} - \frac{1}{C'_{pl}} (C'_g + C'_w) \dot{U}_x = \frac{1}{C'_{pl}} C'_w \cdot U_0 \quad (1)$$

где x – расстояние от фазного провода; U_x – напряжение в точке на расстоянии x от фазного провода; C'_{pl} – собственная удельная емкость тарелки изолятора; C'_g – удельная емкость отдельных изоляторов гирлянды относительно земли; C'_w – удельная емкость отдельных изоляторов относительно фазного провода; U_0 – напряжение фазного провода.

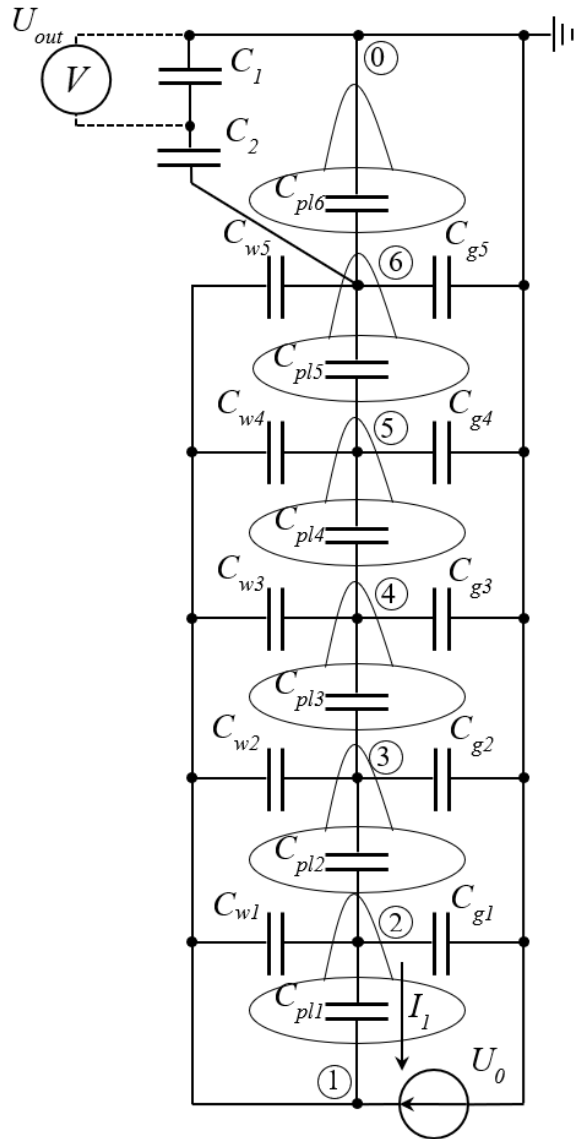


Рис. 4. Схема замещения линейного изолятора.⁴

Решение уравнения (1) имеет вид:

^{3,4} Appendix 1

$$\dot{U}_x = A_1 e^{\alpha x} + A_2 e^{-\alpha x} + B$$

где

$$\alpha = \sqrt{\frac{C'_w + C'_g}{C'_{pl}}};$$

$$B = U_0 \frac{C'_g}{C'_w + C'}$$

частное решение неоднородного уравнения.

Коэффициенты A_1 и A_2 определяются из следующих граничных условий:

$$\text{при } x = 0 \quad U_x = U_0;$$

$$\text{при } x = l \quad U_x = 0,$$

где l – строительная длина гирлянды изоляторов.

Общее решение уравнения для обозначенных выше граничных условий:

$$U_x = \frac{U_0}{C_g + C_w} \left(C_w + C_g \frac{\text{sh}\alpha(n-i)}{\text{sh}\alpha n} - C_w \frac{\text{sh}\alpha i}{\text{sh}\alpha n} \right)$$

где i – номер тарелки изолятора начиная от высокого потенциала; n – число тарелок изоляторов; C_g – емкость металлических элементов гирлянды относительно земли; C_w – емкость металлических элементов гирлянды относительно провода.

Емкости тарелок стеклянных изоляторов C_{pl} были приняты 50 pF по результатам лабораторных измерений емкости изоляторов ЛЭП 110 kV в ходе данного исследования. Значения паразитных емкостей относительно провода C_w и относительно земли C_g были приняты по данным [20] 0,5 pF и 4 pF соответственно.

При заданных параметрах схемы замещения были рассчитаны потенциалы узлов (U_x), значения которых приведены в табл. 1.

Таблица 1⁵.

Потенциалы узлов схемы замещения⁶

№ узла (Node No)	U_x , kV	U'_x , kV
1	63,50	63,50
2	47,17	47,14
3	34,49	34,39
4	24,29	24,09
5	15,65	15,33
6	7,79	7,31

Полученные значения позволяют оценить необходимый уровень электрической стойкости изоляции датчика напряжения. Так как потенциал точки «б», к которой подключается проектируемый датчик, не превышает 10 kV в разных эксплуатационных режимах, то и изоляция датчика должна быть рассчитана на указанное напряжение.

Емкости конденсаторов C_1 и C_2 емкостного делителя контроля напряжения (см. рис. 5) рассчитывались из условия обеспечения требований к уровню напряжения вторичных цепей. Выходное напряжение емкостного делителя U_{out} , подаваемое на измерительный цифровой вход, принято стандартного уровня 100 V.

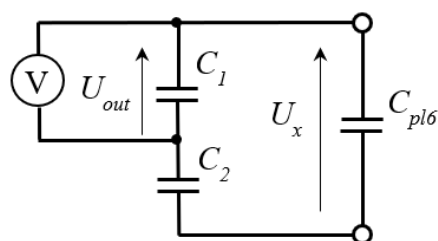


Рис. 5. Схема емкостного делителя.⁷

Принимая $U_{out} = 100$ V, коэффициент деления емкостного делителя составит:

$$k = \frac{U_{x6}}{U_{out}} = \frac{C_1 + C_2}{C_2} = \frac{7790}{100} = 77.9 \quad (2)$$

Значение емкости конденсатора C_2 высоковольтного плеча было принято 4,7 pF из стандартного ряда. Емкость C_1 рассчитана из выражения (2) следующим образом

$$C_1 = C_2(k - 1) = 4.7 \cdot 10^{-12}(77.9 - 1) = 361.4 \text{ (пФ)}$$

Значение емкости конденсатора C_1 низковольтного плеча так же было выбрано из стандартного ряда 330 pF.

С учетом принятых параметров емкостного делителя C_1 и C_2 методом узловых потенциалов были рассчитаны фактические значения потенциалов узлов схемы замещения (U'_x) для нормального режима. Результаты расчетов совпадают с представленными в табл. 1.

Для оценки чувствительности датчика напряжения к обнаружению изоляторов, потерявших изоляционные свойства, проведен расчет напряжений на выходе емкостного делителя ($U_{вых}$) при появлении поврежденного изолятора в гирлянде. Учитывая нелинейность распределения потенциала вдоль гирлянды

изоляторов, полученные значения $U_{\text{вых}}$ различаются в зависимости от местоположения поврежденного изолятора в гирлянде. Рассчитанные значения напряжения ($U_{\text{out_calc}}$) для гирлянды ЛЭП 110 kV с шестью изоляторами в зависимости от номера поврежденного изолятора представлены в табл. 2.

Также было проведено исследование напряжения U_{out} предлагаемого датчика с использованием компьютерной модели в программном комплексе *Multisim*. Результаты моделирования при различных состояниях гирлянды представлены в табл. 2. Имитация пробоя тарелки изолятора осуществлялась её

шунтированием с помощью проводящего звена. Полученные значения ($U_{\text{out_mod}}$) имеют сопоставимую величину с результатами расчета ($U_{\text{out_calc}}$).

Таким образом, при появлении поврежденного изолятора изменение напряжения ΔU_{out} изменяется в пределах от 22,8 до 30,9 V. Фиксируя это изменение напряжения U_{out} можно сделать вывод о наличии в гирлянде поврежденных изоляторов. Однако при таком способе диагностики возникает вопрос о чувствительности к различным перенапряжениям.

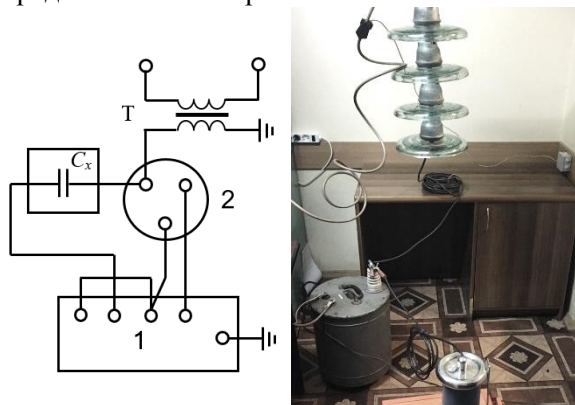
Таблица 2⁸.

Зависимость U_{out} емкостного делителя датчика контроля изоляции от положения поврежденного изолятора (начиная от фазного провода)⁹

№ поврежд. изолятора (Damage no. Insulator)	1	2	3	4	5	6
$U_{\text{out_mod}}, \text{V}$	133,6	127,4	125,5	126,7	131,7	≈0
$U_{\text{out_calc}}, \text{V}$	133,4	127,2	125,3	126,6	131,5	≈0

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведены лабораторные исследования емкостей стеклянных изоляторов ЛЭП 110 kV, как новых, так и поврежденных. Измерения емкостей осуществлялись с использованием измерительного моста по схеме, представленной на рис. 6.



C_x – измеряемая емкость; T – испытательный трансформатор; 1 - измерительный мост; 2 – образцовый конденсатор $U_n = 10 \text{ kV}$ с емкостью 489 pF

(C_x – measured capacitance; T – test transformer; 1 – measuring bridge; 2 – standard capacitor $U_n = 10 \text{ kV}$ with a capacity of 489 pF)

Рис. 6. Схема эксперимента по измерению емкостей.¹⁰

На основе измерений емкостей семнадцати не поврежденных изоляторов установлено, что их емкость изменяется незначительно, охватывая диапазон от 44 до 46 pF. В отличие от этого, емкость поврежденных изоляторов охватывает значительный диапазон значений, варьируясь от 161 до 3500 pF. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что наличие в гирлянде изолятора с емкостью порядка 2000 pF и выше эквивалентно появлению проводящего звена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Компьютерное моделирование разработанного датчика в системе *Multisim* подтвердило возможность использования в качестве критерия диагностики состояния изоляции значение величины падения напряжения на верхней тарелке гирлянды изоляторов. Установлено, что при повреждении изолятора выходное напряжение датчика увеличивается более чем на 20 % относительно установленного значения, что позволяет отстроить систему от ложных срабатываний при режимных изменениях фазного напряжения, и однозначно судить о наличии дефекта.
2. Измерение значения падения величины напряжения с помощью емкостного датчика, использующего верхнюю тарелку в качестве высоковольтного плеча и, представляющего

собой соединение двух типовых высоковольтных керамических конденсаторов, помещенных в изолирующую оболочку, обеспечивает решение поставленной задачи. Датчик закрепляется на заземленной траверсе, при этом максимальный уровень измеряемого напряжения не превышает 10 kV.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1.** Potential distribution curve along a high-voltage insulator (1 – all insulators are in good condition; 2 – in the presence of a damaged insulator).

²**Fig. 2.** Schematic diagram of measuring the voltage drop across the insulator plate (C_{pl} - capacitance of the insulator plates; C_w - parasitic capacitances relative to the current-carrying part; C_g - parasitic capacitances relative to the ground).

³**Fig. 3.** Design diagram of a voltage sensor for an insulation monitoring system (1 – ADC; 2 – data transmission block).

⁴**Fig. 4.** Linear insulator equivalent circuit.

^{5,6}**Table 1.** Potentials of equivalent circuit nodes.

⁷**Fig. 5.** Capacitive divider circuit.

^{8,9}**Table 2.** Dependence of U_{out} of the capacitive divider of the insulation monitoring sensor on the position of the damaged insulator (starting from the phase wire).

¹⁰**Fig. 6.** Scheme of the experiment to measure capacitances (C_x – measured capacitance; T – test transformer; 1 - measuring bridge; 2 – standard capacitor $U_n = 10$ kV with a capacity of 489 pF).

БИБЛИОГРАФИЯ (REFERENCES)

[1] STO 56947007–29.080.15.231–2016. Metodicheskiye ukazaniya po provedeniyu uskorennykh ispytaniy na stareniiye izolyatorov lineynykh podvesnykh sterzhnevyykh polimernykh na napryazheniye 110-750 kV [Organization standard 56947007–29.080.15.231–2016. Guidelines for conducting accelerated aging tests of linear suspension rod polymer insulators for voltage 110-750 kV]. Moscow, PJSC FGC UES, 2016.

[2] STO 56947007-29.240.069-2011. Izolyatory podvesnyye dlya VL 110–750 kV. Metody ispytaniy [Organization standard 56947007-29.240.069-2011. Suspension insulators for 110–750 kV overhead lines. Test methods]. Moscow, PJSC FGC UES, 2011.

[3] STO 56947007-29.240.55.159-2013. Tipovaya instruktsiya po organizatsii rabot dlya opredeleniya mest povrezhdeniy vozduzhnykh liniy elektropredachi napryazheniyem 110 kV i vyshhe [Organization standard 56947007-29.240.55.159-2013. Standard instructions for organizing work to determine locations of damage to overhead power lines with voltages of 110 kV and higher]. Moscow, PJSC FGC UES, 2013.

[4] vom Bögel G., Iversen N., Schofield O.B. Cousin L. and Ayoub N. Design integration and

implementation of an intelligent and self-recharging drone system for autonomous power line inspection. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2021, pp. 4168-4175.

[5] Rahman E. Ur, Zhang Y., Ahmad S., Ahmad H. I. and Jobaer S. Autonomous vision-based primary distribution systems porcelain insulators inspection using UAVs. *Sensors (Switzerland)*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 1-24.

[6] Tereschenko N., Miroshnik V. and Polyakov D. Continuous Diagnostic Device for Pin Insulators. *2022 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, Omsk, Russian Federation, 2022, pp. 1-4. doi: 10.1109/Dynamics56256.2022.10014882.

[7] Villalobos R. J., Moran L. A., Huenupán F., Vallejos F., Moncada R. and Pesce G. C. A New Current Transducer for On-Line Monitoring of Leakage Current on HV Insulator Strings. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 78818-78826. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3191349.

[8] Titov D. E., Volkhov K. V., Kudryavtsev A. A. K voprosu diagnostiki lineynoy izolyatsii [On the issue of diagnostics of linear insulation]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye – Electricity. Transmission and distribution*, 2017, no. 6(45), pp. 114-120. (In Russian).

[9] STO 34.01-23.1-001-2017. Ob"yem i normy ispytaniy elektrooborudovaniya [Organization standard STO 34.01-23.1-001-2017. Scope and standards for testing electrical equipment]. Moscow, PJSC FGC UES, 2017.

[10] Singh L., Alam A., Kumar K. V., Kumar D., Kumar P. and Abdin Z. Environmental technology & innovation design of thermal imaging-based health condition monitoring and early fault detection technique for porcelain insulators using Machine learning. *Environ. Technol. Innov*, 2021, vol. 24(2), 102000.

[11] Zaripov D., Nasibullin R. Experimental system for continuous monitoring of overhead power lines and substations insulation. *E3S Web of Conferences*, Kazan, 2020, vol. 216(4), 01053. (In Russian). DOI 10.1051/e3sconf/202021601053.

[12] Gómez F. A., Albarracín-Sánchez R., Vecino F. G. and Arrabé R. G. Diagnosis of insulation condition of mv switchgears by application of different partial discharge measuring methods and sensors. *Sensors (Switzerland)*, 2018, vol. 18, no. 3.

[13] Afrouzi H. N., Hassan A., Tay D., Chee Ye, Mehranzamir K., Malek A. Z. In-depth exploration of partial discharge modelling methods within insulations. *vol. Clean. Eng. Technol.*, 2022, pp. 100390.

[14] Samaitis V., Mažeika L. and Jankauskas A., 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, no. 1, pp. 20.

- [15] Frizzo Stefenon S., Silva M. C., Bertol D. W., Meyer L. H. and Nied A. Fault diagnosis of insulators from ultrasound detection using neural networks. *J. Intell. Fuzzy Syst.*, 2019, vol. 37, no. 5, pp. 6655-6664.
- [16] Wouters P. A. A. F., Barakou F., Gargari S. M., Smit J. and Steennis E. F. Accuracy of Switching Transients Measurement with Open-air Capacitive Sensors near Overhead Lines. *2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Athens, Greece, 2018, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICHVE.2018.8642167.
- [17] Bobowski J. S., Ferdous M. S. and Johnson T. Calibrated Single-Contact Voltage Sensor for High-Voltage Monitoring Applications. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, vol. 64, no. 4, pp. 923-934. doi: 10.1109/TIM.2014.2360804.
- [18] Zhou, Q.; He, W.; Li, S.; Hou, X. Research and Experiments on a Unipolar Capacitive Voltage Sensor. *Sensors*, 2015, vol. 15, 20678-20697. doi: 10.3390/s150820678.
- [19] Rezevig D.V. *Tekhnika vysokikh napryazheniy [High Voltage Technique]*, Moscow: Energy, 1976. 267 p.
- [20] Boboyev H. D. Analiz i otsenka kosvennykh metodov opredeleniya parametrov izolyatsii setey napryazheniyem vyshе 1000 V [Analiz i otsenka kosvennykh metodov opredeleniya parametrov izolyatsii setey napryazheniyem vyshе 1000 V]. *Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont - Electrical equipment: operation and repair*, 2021, no. 10, pp. 46-50.

Сведения об авторах



Андреев Евгений Сергеевич,

к. т. н., доцент кафедры «ЭЭС». Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленск. Область научных интересов: диагностика высоковольтной изоляции, сети постоянного тока
E-mail: root67@mail.ru



Шунаев Сергей Анатольевич,

старший преподаватель кафедры «ЭЭС». Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленск. Область научных интересов: диагностика высоковольтной изоляции, техника высоких напряжений, сети постоянного тока
E-mail: sergey_shunaev@mail.ru