

РАСЧЕТ ДОБАВОЧНОГО ШУНТА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ИЗОЛЯТОРОВ

Цель исследования произвести обзор существующих устройств и методов для диагностики и мониторинга состояния высоковольтной изоляции, которая играет важную роль в критерии надежности энергосистемы. Одним из основных методов диагностики изоляторов является визуальный осмотр. На данный момент широкое распространение завоевали онлайн-методы, позволяющие зафиксировать процесс разрушения изоляции под напряжением. Несмотря на существование различных методов и устройств, проблема своевременного обнаружения ухудшения состояния изоляции в режиме эксплуатации на данный момент не решена. Данная задача была решена использованием добавочной конструкции шунта. При достижении поставленной задачи применялся метод расчета прочностного анализа добавочного шунта, а также выполнено моделирование данного процесса в программе ANSYS. В результате исследования с данной конструкцией шунта проведен ряд экспериментов, которые подтвердили его работоспособность. Благодаря наличию шунта удалось зафиксировать токи утечки порядка нескольких десятков микроампер. Таким образом, авторы предлагают датчик тока, который выполнен в виде добавочного резистивного шунта.

Ключевые слова: изолятор, переменное напряжение, ток утечки, резистивный шунт.

Введение. Изоляция, как и проводник, является неотъемлемой частью всех электрических машин и аппаратов. В воздушных линиях электропередачи (ВЛЭП) есть естественная часть изоляции — воздух и искусственная — стеклянные, фарфоровые и полимерные изоляторы. Во время работы электроустановок происходит старение изоляции [1]. Поскольку запас электрической прочности довольно большой, то процесс старения идет от 3 до нескольких десятков лет. И может проявляться как возникновение небольших токов утечек, так и пробой с разрушением [2].

В настоящее время для повышения эффективности передачи электроэнергии и безопасности жизни людей разрабатывают различные дистанционные системы мониторинга и диагностики воздушных ЛЭП [3–4]. В [5] предложена система онлайн-мониторинга и диагностики состояния воздушных линий на средний класс напряжений с применением искусственного интеллекта. Она состоит из линейных датчиков, которые измеряют электрические параметры и по радиосвязи в режиме реального времени передают данные на подстанцию для дальнейшей обработки. В [6] особое внимание уделяют процессу диагностики состояния линий электропередачи с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Авторы статьи [7] предлагают

усовершенствованный алгоритм метода обнаружения дефектов изоляторов путем качественной обработки полученных изображений (аэрофотоснимков) с БПЛА. В [8] описан метод обнаружения дефектных изоляторов по анализу оптических изображений. Сначала идентифицируют повреждённый изолятор среди всех, а после — осуществляют поиск места дефекта с применением сегментации исследуемого объекта и преобразованием характеристик пространства вокруг него. Авторы источника [9] исследуют подвесные изоляторы по измерению тока утечки и анализу его гармонических составляющих для определения уровня загрязнений гирлянд изоляторов. Также в источниках [10, 11] по параметрам: ток утечки, коэффициент диэлектрических потерь, емкость, электрический заряд диагностируют фарфоровые изоляторы на предмет загрязнения и, как следствие, определяют процесс уменьшения электрической прочности изолятора. В статье [12] авторы для непрерывного мониторинга изоляторов используют метод, в основе которого лежит определение уровня электромагнитного излучения с учетом параметров окружающей среды.

В рамках перехода энергетического сектора к цифровизации и автоматизации [13] актуальной задачей является создание устройств мониторинга и диагностики воздушной ЛЭП, которые позволят

спрогнозировать проблемные ситуации в локальном сегменте линии, заблаговременно, оперативно и точно устранить их. Известно [14] автоматическое детекторное устройство для контроля состояния изоляторов воздушной линии, которое измеряет и анализирует ток утечки изолятора по двум показателям: коэффициент гармоник и косинус разности фаз между сигналами напряжения и тока утечки. Прибор состоит из приемника и передатчика, которые для связи используют радиосигнал. Недостаток данного устройства заключается в большом количестве данных, которые нужно обрабатывать.

В устройстве, описанном в [15], представлен оптоволоконный датчик, измеряющий четыре параметра: ток утечки, температуру, влажность и точку росы в разных трех местах линии электропередачи. Устройство передает информацию на сервер о состоянии изоляторов на 500 кВ в режиме реального времени через сеть сотовой связи (GPRS). Доступ к информации можно получить по интернету. Недостаток метода — большой объем передачи и обработки данных.

В другом устройстве [16] приведён датчик напряжения для дистанционного контроля целостности высоковольтной изоляции. Он устанавливается на фазном проводе воздушной линии и не имеет электрического соединения с землей. Датчик измеряет падение напряжения на каждом изоляторе гирлянды и по беспроводной сети непрерывно передает информацию о значении напряжения. Так как устройство оптоэлектронное, то имеет ряд преимуществ: отсутствует нагрузочный эффект вторичного замыкания и потери; полоса пропускания обеспечивает более быструю реакцию на всплеск и переходные токи; надежная изоляция между высоким напряжением и вторичной измерительной цепью. Недостатком устройства является влияние продольного магнитооптического эффекта Фарадея.

Таким образом, диагностика и мониторинг состояния изоляторов является актуальной задачей в настоящее время.

Постановка задачи. Проблема состоит в своевременном определении уменьшения до критического значения остаточного ресурса изоляции в режиме эксплуатации. Для решения задачи предлагается последовательно с изолятором включить специальный резистивный шунт. В данной статье описана конструкция шунта, приведен расчет на его механическую прочность, электротехнический расчет. Практическая значимость работы обусловлена в применении рассчитанного шунта, который входит в состав несложного диагностического устройства, для использования в энергетических компаниях в рамках цифровизации сетей и подстанций.

Устройство и принцип работы предлагаемого датчика тока. Для диагностики изоляторов авторы ранее предложили датчик тока в виде высокоомного шунта [17, 18]. Благодаря последовательному подключению шунта с изолятором и подсоединив параллельно к шунту диагностическое устройство, следит за током утечки изолятора под напряжением и без прямого участия персонала.

В качестве самого простого диагностического устройства (рис. 1) может быть измерительное реле напряжения KV1 (чувствительный нуль-орган), подключаемое параллельно шунту, которое срабатывает при превышении критического значения тока утечки $I_{\text{ут.кр}}$. Падение напряжения на шунте в этом случае превышает уставку KV1 — $U_{\text{с.р}}$, что позволяет сработать реле и показать повреждающийся

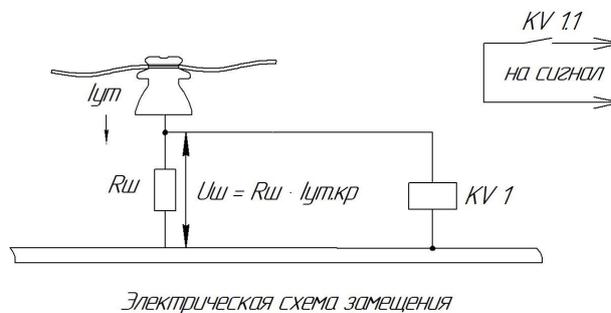


Рис. 1. Подключение измерительного реле напряжения KV1

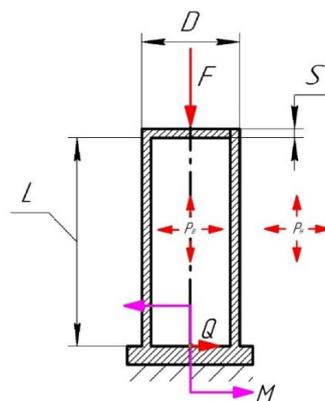


Рис. 2. Механические параметры участка трубы

изолятор. Так как процесс повреждения изолятора происходит медленно, не всегда быстро и лавинообразно, то у персонала есть время для его замены. Это позволяет своевременно исключить повреждение опорного или штыревого изолятора с возникновением короткого замыкания (КЗ) в системе с заземленной нейтралью или однофазного замыкания на землю в системе с изолированной нейтралью.

Расчет и проверка механической прочности. Чтобы не снижать надежность введением дополнительного элемента (шунта) в конструкцию ВЛЭП и не ослаблять механическую стойкость штыревых изоляторов, далее представлен расчет механической прочности высокоомного шунта в соответствии с нормативной документацией (рис. 2).

Значения для исходных параметров (табл. 1) получены из ГОСТ 14249 – 89:

$$I_{np} = L \cdot \mu = 280 \text{ мм}, \quad (1)$$

где L — длина стержня, на который крепится изолятор;

μ — коэффициент приведенной длины.

Гибкость определяют по формуле:

$$\lambda = \frac{2,83 \cdot I_{np}}{D + (s - c)} = 52,8, \quad (2)$$

где I_{np} — приведенная расчетная длина трубы;

D — наружный диаметр трубы;

$(s - c)$ — расчетная толщина стенки трубы.

Значения исходных параметров для механического расчета

	Исходные данные	Обозначения	Значения	Ед.изм.
1	Модуль упругости стали	E	199 000	МПа
2	Допускаемые напряжения стали	$[\sigma]$	154	МПа
3	Коэффициент запаса устойчивости	n_y	2,4	—
4	Коэффициент приведенной длины	μ	2,0	—
5	Коэффициент прочности сварного продольного шва	φ_p	0,65	—
6	Наружный диаметр трубы	D	20	мм
7	Толщина стенки трубы	s	5,0	мм
8	Расчетная длина трубы	L	140	мм
9	Осевое сжимающее усилие	F	35,0	Н

Безразмерный коэффициент:

$$B_1 = \min \left(1,0; 9,45 \cdot \frac{D}{l} \sqrt{\frac{D}{100(s-c)}} \right) = 0,095. \quad (3)$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление следует рассчитывать по формуле:

$$[p]_B = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s-c)}{D + (s-c)} = 66,7 \text{ Мпа}, \quad (4)$$

где φ_p — коэффициент прочности сварного продольного шва;

σ — допускаемое напряжение стали.

Допускаемое наружное давление из условия прочности следует рассчитывать по формуле:

$$[p]_H = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s-c)}{D + (s-c)} = 102,7 \text{ Мпа}. \quad (5)$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[p]_E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot E \cdot D}{n_y \cdot B_1 \cdot l} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s-c)}{D} \right]^{2,5} = 22813,1 \text{ Мпа}, \quad (6)$$

где E — модуль упругости стали;

B_1 — безразмерный коэффициент;

n_y — коэффициент запаса устойчивости.

Коэффициент запаса устойчивости при расчете сосудов и аппаратов на устойчивость по нижним критическим напряжениям в пределах упругости следует принимать:

2,4 — для рабочих условий;

1,8 — для условий испытания и монтажа.

Допускаемое наружное избыточное давление:

$$[p]_H = \frac{[p]_H}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_H}{[p]_E} \right)^2}} = 102,7 \text{ Мпа}, \quad (7)$$

где $[p]_H$ — допускаемое наружное давление по прочности;

$[p]_E$ — допускаемое наружное давление по устойчивости.

Допускаемое осевое сжимающее усилие по прочности:

$$[F]_H = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 36285,4 \text{ Н}. \quad (8)$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости в пределах упругости:

$$[F]_{E_1} = \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E \cdot D^2}{n_y} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s-c)}{D} \right]^{2,5} = 45438976,4 \text{ Н}. \quad (9)$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие по общей устойчивости в пределах упругости:

$$[F]_{E_2} = \frac{\pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot E}{n_y} \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 = 69094,9 \text{ Н}. \quad (9.1)$$

Допускаемое осевое усилие по устойчивости:

$$[F]_E = \min \{ [F]_{E_1}; [F]_{E_2} \} = 69094,9 \text{ Н}. \quad (10)$$

Допускаемое осевое усилие:

$$[F] = \frac{[F]_H}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_H}{[F]_E} \right)^2}} = 32125,0 \text{ Н}. \quad (11)$$

Допускаемый изгибающий момент по прочности:

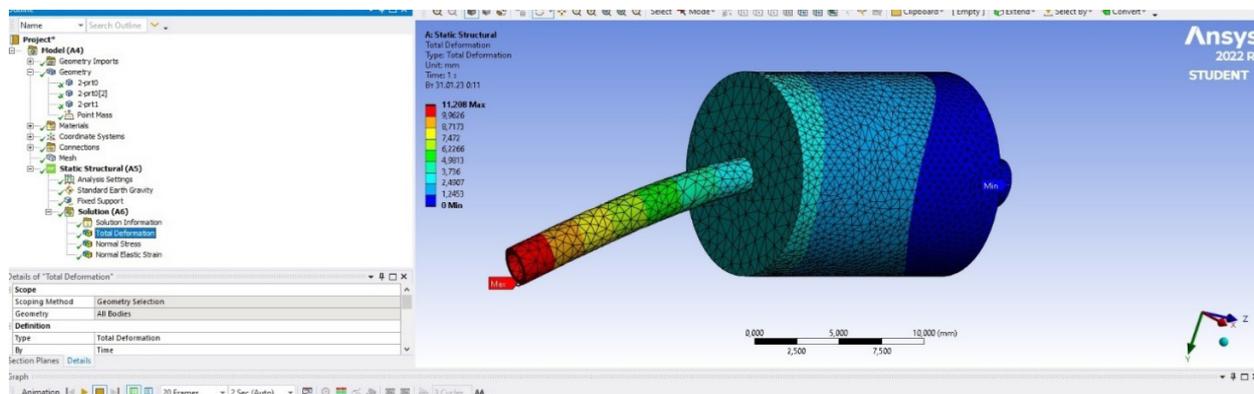
$$[M]_H = \frac{\pi}{4} \cdot D \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 90,7 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (12)$$

Допускаемый изгибающий момент по устойчивости в пределах упругости:

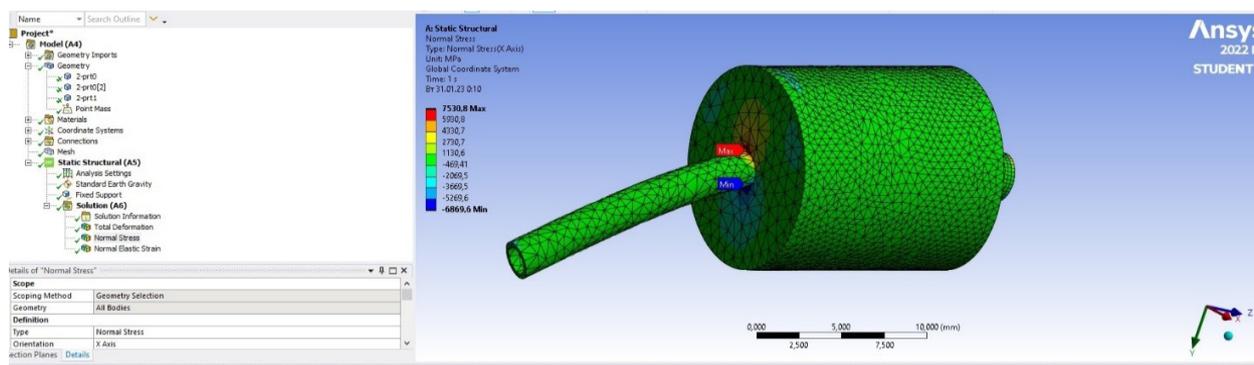
$$[M]_{E_1} = \frac{89 \cdot 10^{-6} \cdot E \cdot D^2}{n_y} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s-c)}{D} \right]^{2,5} = 1304538 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (13)$$

Допускаемый изгибающий момент:

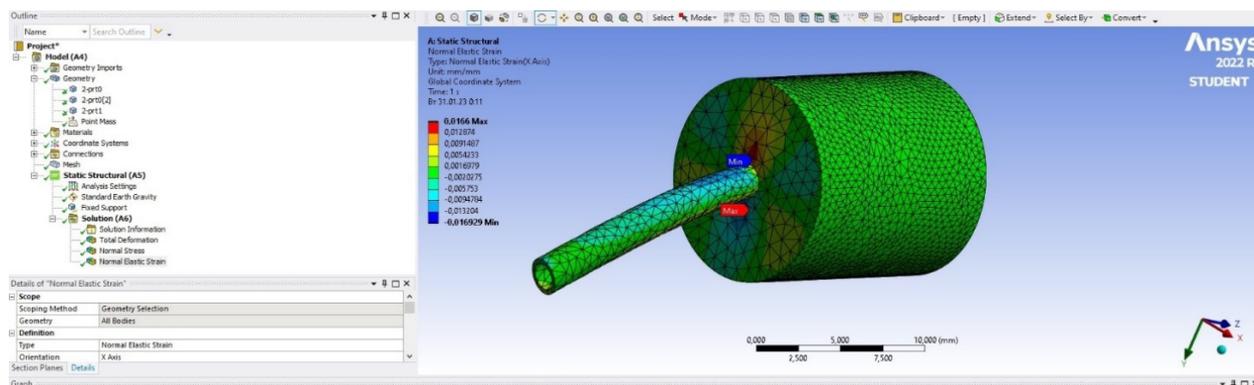
$$[M] = \frac{[M]_H}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_H}{[M]_{E_1}} \right)^2}} = 90,7 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (14)$$



а)



б)



в)

Рис. 3. Модель конструкции шунта в пакете ANSYS: а) общая деформация шунта, б) механическое напряжение в шунте, в) механическая деформация

Допускаемое поперечное усилие по прочности:

$$[Q]_n = 0,25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 6047,6 \text{ Н.} \quad (15)$$

Допускаемое поперечное усилие по устойчивости в пределах упругости:

$$[Q]_E = \frac{2,4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot [0,18 + 3,3 \cdot \frac{D \cdot (s - c)}{I^2}] = 937381,4 \text{ Н.} \quad (16)$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_n}{[Q]_E}\right)^2}} = 6047,4 \text{ Н.} \quad (17)$$

Для проверки на устойчивость при совместном действии на объект наружного давления, осевого

сжимающего усилия, изгибающего момента и поперечного усилия необходимо выполнение условия:

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 \leq 1,0. \quad (18)$$

При расчете суммарного коэффициента по правой части формулы (18) дополнительно учли воздействие груза массой 36 кг:

$$0,01 \leq 1,0.$$

Таким образом, условие устойчивости даже с дополнительным грузом массой в 36 кг выполняется, следовательно, конструкция шунта соответствует нормам.

Для подтверждения механической прочности изготовленного шунта при помощи программного пакета КОМПАС 3D была построена его сборка. Она

выполняла функцию геометрической модели при расчете механики деформируемого твердого тела в статической постановке (Static Structural) в программном комплексе ANSYS. При помощи команды Mesh методом конечных элементов была выстроена модель тела, количество элементов в структуре составило 26231, где шаг сетки 0,5 мм. Также были заданы параметры модели: контакт на стенках шунта — воздух при температуре 25 °С. На шунт действует параметр: Standard Earth Gravity (стандартная гравитация): 9,8 м·с⁻². В модели были заданы параметр Fixed Support — жесткая заделка (ограничение всех степеней свободы) и параметр Point mass: 36 кг. Выполнение расчетов производилось с учетом расстановки сил, а также задания нагрузки на точку в конце шунта. При моделировании были использованы три операции:

Total Deformation — общая деформация шунта (максимальное значение составило 11,2 мм, минимальное значение 0 мм);

Normal Stress — механическое напряжение в шунте (максимальное значение составило 7530,8 МПа, минимальное значение — 6869,6 МПа);

Normal Elastic Strain — механическая деформация (максимальное значение составило 0,0166 мм, минимальное значение — 0,016929 мм), результаты которых представлены на рис. 3а, б и в соответственно. Таким образом, при воздействии груза массой 36 кг деформация шунта незначительна, соответственно, он должен её выдержать.

После моделирования был проведен эксперимент с использованием стержня в стене, конструкции шунта, изолятора, крепления и груза весом 36 кг (рис. 4).

Электротехнические экспериментальные исследования. В лаборатории был проведен ряд экспериментов с разработанной конструкцией шунта и диагностическим устройством.

В соответствии с [19] сопротивление изолятора должно быть не меньше 300 МОм. При напряжении 6 кВ, ток утечки составляет:

$$I_{ут} = \frac{U_c}{R_{из}} = \frac{6000}{300000000} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ А.} \quad (19)$$

U_c — напряжение сети, В;

$R_{из}$ — сопротивление изолятора, Ом.

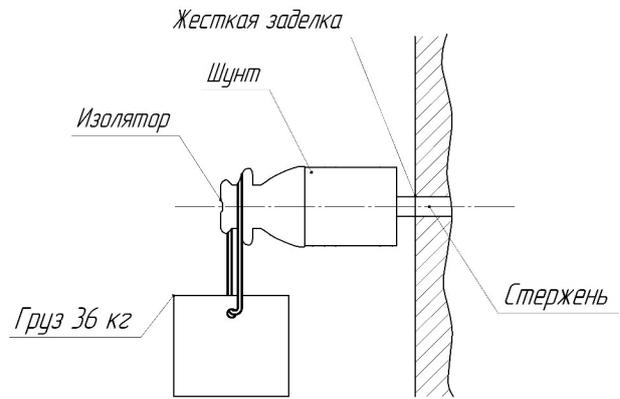


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для проверки механической прочности

В таком случае падение напряжения на шунте с сопротивлением 17,9 кОм составит:

$$U_{ш} = R_{ш} \cdot I_{ут} = 17900 \cdot 20 \cdot 10^{-6} = 0,358 \text{ В.} \quad (20)$$

Чтобы иметь запас по чувствительности ($k_q = 1,5$), несколько уменьшим уставку напряжения срабатывания и положим $U_{ср} = 0,24 \text{ В}$.

Для подачи переменного напряжения применяли источник переменного напряжения АИД-70М. Активное сопротивление шунта $R = 17,9 \text{ кОм}$. Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 5. Критическое значение тока утечки:

$$I_{ут.кр} = \frac{U_{ш}}{R_{ш}} = \frac{0,24}{17900} = 13,4 \cdot 10^{-6} \text{ А.} \quad (21)$$

В ходе проведения физического эксперимента были исследованы дефектный и здоровый штыревые изоляторы марки ШФ-10Г. Дефект был выполнен в виде вертикального скола глазури изолятора, заполненного графитом. При подаче напряжения 10 кВ диагностическое устройство сработало только при подключенном дефектном изоляторе. Ток утечки составил 37,4 мкА, следовательно, его сопротивление рассчитаем по формуле:

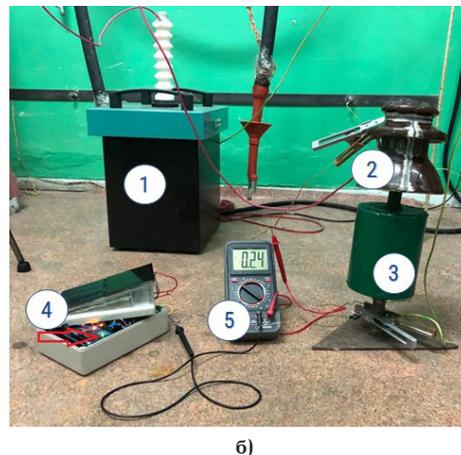
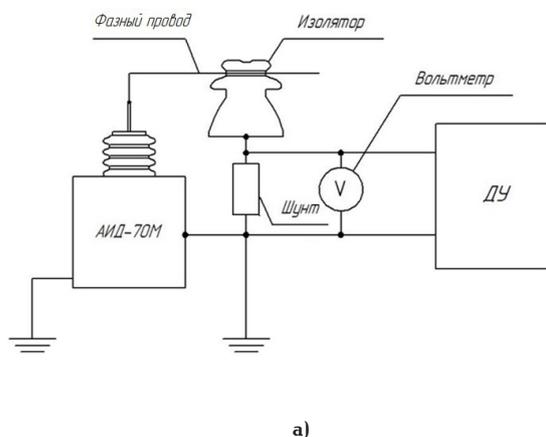


Рис. 5. Электротехническая схема экспериментального исследования:
а) блок-схема исследования; б) фотография экспериментального исследования:
1 — АИД-70М, 2 — штыревой изолятор, 3 — высокоомный шунт, 4 — ДУ, 5 — вольтметр

$$R_{\text{из.ДЕФ}} = \frac{U_C - U_{\text{ш}}}{I_{\text{ут}}} = \frac{10000 - 0,24}{37,4 \cdot 10^{-6}} = 267373262 \text{ Ом.} \quad (22)$$

Таким образом, значение сопротивления оказалось меньше допустимого, что подтвердило наличие ухудшения состояния изоляции.

Методика осуществления дистанционного контроля старения опорного, штыревого изоляторов в режиме эксплуатации имеет следующие этапы:

1) определение падения напряжения на шунте $U_{\text{ш}}$ при помощи диагностического устройства;

2) оценка тока утечки $I_{\text{ут}}$;

3) при превышении порогового значения $I_{\text{ут}}$ и срабатывании диагностического устройства при заданной уставке произвести замену изолятора.

Обсуждение результатов. В процессе моделирования конструкции шунта, при воздействии механических сил, уязвимым местом (выделена красным цветом на рис. 3в) являлась область сварного шва. При воздействии груза массой 36 кг, соответственно, силы 352,8 Н, отклонение при деформации составило 0,0166 мм, что является допустимым для нормальной работы шунта. При подвешивании груза весом 36 кг конструкция шунта визуально не деформировалась.

Последовательно подключенный шунт с изолятором позволил диагностическому устройству снять падение напряжения с шунта и при известном активном сопротивлении рассчитать ток утечки. Значения тока утечки были порядка нескольких десятков микроампер, диагностическое устройство сработало и показало о несоответствии сопротивления изолятора.

Таким образом, экспериментальный образец шунта обладает достаточной механической прочностью и экспериментально подтверждена его работоспособность под напряжением.

Заключение. Изоляторы являются одним из важнейших элементов, которые обеспечивают надежность энергетической системы в целом. Отказ изолятора вызывает значительные материальные потери, которые в несколько раз превышают его стоимость. При возникновении отказов линии электропередачи потребители могут на значительное время остаться без электроэнергии. Таким образом, диагностика изоляторов имеет важное значение в обеспечении надежности электроснабжения. Существующие методы диагностики изоляторов сложны, требуют наличия опытного персонала и возможности онлайн-измерений.

В работе представлен простой метод диагностики и мониторинга штыревых и опорных изоляторов за счет измерения тока утечки. Когда изолятор находится под высоким напряжением, через него протекает ток утечки. Величина этого тока зависит от состояния изолятора и условий окружающей среды. При наличии повреждений или загрязнений ток утечки изолятора в процессе старения увеличивается, тем самым ускоряется процесс разрушения изоляции. Постоянное длительное воздействие тока утечки вызывает нагрев, ускоряет процессы старения изолятора и уменьшает его диэлектрическую прочность. Для мониторинга данного параметра авторами был разработан высокоомный шунт для диагностики штыревых и опорных изоляторов. Произведен для шунта механический расчет. Проведены экспериментальные электротехнические

высоковольтные исследования, в которых добавочный шунт прошёл лабораторные испытания.

Библиографический список

1. Valeriy I., Iosif B. Predicting the service life of high-voltage insulators using actual leakage current values // Current Science. 2022. Vol. 122, № 4. P. 455–460.
2. Salem A. A., Lau K. Y., Rahima, W. [et al.]. Leakage current characteristics in estimating insulator reliability: experimental investigation and analysis // Scientific reports. 2022. Vol. 12, № 1. P. 1–21. DOI: 10.1038/s41598-022-17792-x.
3. Иванов, Д. А., Голенищев-Кутузов, А. В., Галиева, Т. Г. и др. Система мониторинга состояния высоковольтной изоляции // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXI Бенардосовские чтения): материалы междунар. науч.-техн. конф., посвященной 140-летию изобретения электросварки Н. Н. Бенардосом, 02–04 июня 2021 г. Иваново, 2021. С. 81–84.
4. Пат. 2753811 Российская Федерация, МПК G01R 31/12. Способ и устройство бесконтактного дистанционного контроля технического состояния высоковольтных линейных изоляторов воздушных линий электропередач / Катков В. И., Евдокимов Ю. К., Сагдиев Р. К., Охоткин Г. П. № 2020126832; заявл. 29.04.20; опубл. 23.08.21, Бюл. № 24.
5. Hashmi G., Aljohani K., Kamarudin J. Intelligent Fault Diagnosis for Online Condition Monitoring of MV Overhead Distribution Networks // 2022 4th International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAAD). 2022. Vol. 1. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICAAD51067.2022.9799512.
6. Luo Y., Yu X., Yang D. [et al.]. A survey of intelligent transmission line inspection based on unmanned aerial vehicle // Artificial Intelligence Review. 2022. P. 1–29. DOI: 10.1007/s10462-022-10189-2.
7. Qiu Z., Zhu X., Liao C. [et al.]. Detection of Transmission Line Insulator Defects Based on an Improved Lightweight YOLOv4 Model // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, № 3. 1207. DOI: 10.3390/app12031207.
8. Zhang Z., Huang S., Li Y. [et al.]. Image detection of insulator defects based on morphological processing and deep learning // Energies. 2022. Vol. 15, № 7. 2465. DOI: 10.3390/en15072465.
9. Villalobos R. J., Moran L. A., Huenupán F. [et al.]. A New Current Transducer for On-Line Monitoring of Leakage Current on HV Insulator Strings // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 78818–78826. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3191349.
10. Dolník B., Šárpatky L., Kolcunová I. [et al.]. Sensing Method Using Multiple Quantities for Diagnostic of Insulators in Different Ambient Conditions // Sensors. 2022. Vol. 22, № 4. 1376. DOI: 10.3390/s22041376.
11. Li Z., Ding L., Liu J. UV detection technology of insulator discharge based on UAV platform // 2022 IEEE International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA). 2022. P. 261–265. DOI: 10.1109/EEBDA53927.2022.9744897.
12. Галиева Т. Г., Иванов Д. А., Садыков М. Ф. [и др.]. Метод и устройство диагностики состояния высоковольтных изоляторов на основе непрерывной регистрации пространственного уровня электромагнитного излучения частичных разрядов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24, № 4. С. 165–177. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-4-165-177.
13. Баринаева В. А., Девятова А. А., Ломов Д. Ю. Роль цифровизации в глобальном энергетическом переходе и в российской энергетике // Вестник международных организаций: образование, наука, новая экономика. 2021. Т. 16, № 4. С. 126–145.
14. Palangar M. F., Mohseni S., Mirzaie M. [et al.]. Designing an automatic detector device to diagnose insulator state on overhead distribution lines // IEEE Transactions on Industrial

Informatics. 2021. Vol. 18, № 2. P. 1072–1082. DOI: 10.1109/ТИ.2021.3073685.

15. Werneck M. M., Pinto P. H. S., Bellini R. T. [et al.]. Optical Sensor for Monitoring Leakage Current and Weather Conditions in a 500-kV Transmission Line // *Sensors*. 2022. Vol. 22, № 13. 5034. DOI: 10.3390/s22135034.

16. Andreenkov E., Shunaev S. Sensor design for the diagnostic system of hanging isolated power grids // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076288.

17. Пат. 2020136129 Российская Федерация, МПК H01C 3/00. Конструкция шунта для диагностики опорных и штырьевых изоляторов воздушной линии электропередач / Терещенко Н. А., Мирошник В. Ю., Поляков Д. А., Никитин К. И. № 2020136129; заявл. 03.11.20; опубл. 07.06.21, Бюл. № 16.

18. Терещенко Н. А., Мирошник В. Ю., Холмов М. А. [и др.]. Разработка диагностического устройства штырьевых изоляторов // *Омский научный вестник*. 2021. № 3 (177). С. 70–74. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-177-70-74.

19. Свод правил СП 76.13330.2016 «Электротехнические устройства». Актуализированная редакция СНиП 3.05.06-85: утв. приказом М-ва строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ 16.12.2016. Введ. 17.06.2017. Москва: Стандартинформ, 2017. 82 с.

ТЕРЕЩЕНКО Надежда Андреевна, аспирант кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 4017-2286

AuthorID (РИНЦ): 947723

AuthorID (SCOPUS): 57216615006

Адрес для переписки: nadezhda.tereshchenko@mail.ru
НИКИТИН Константин Иванович, доктор технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая и общая электротехника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3733-8763

AuthorID (РИНЦ): 641865

AuthorID (SCOPUS): 56825489500

Адрес для переписки: nki@ngs.ru

ХОЛМОВ Михаил Александрович, магистрант гр. ЭЭМ-213 кафедры «Теоретическая и общая электротехника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2561-3270

AuthorID (РИНЦ): 1087396

Адрес для переписки: misha97h@gmail.com

НОВОСЁЛОВ Виктор Иванович, кандидат физико-математических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроэнергетика» Тобольского индустриального института (филиал), г. Тобольск.

SPIN-код: 3563-3532

AuthorID (РИНЦ): 816024

Адрес для переписки: vivnovoselov@yandex.ru

Для цитирования

Терещенко Н. А., Никитин К. И., Холмов М. А., Новосёлов В. И. Расчет добавочного шунта для диагностики изоляторов // *Омский научный вестник*. 2023. № 1 (185). С. 86–92. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-86-92.

Статья поступила в редакцию 15.09.2022 г.

© Н. А. Терещенко, К. И. Никитин, М. А. Холмов,
В. И. Новосёлов