Литература

1. Силивонов, Е. А. Обеспечение устойчивого обслуживания грузовых районов станции Колядичи / Е. А. Силивонов // Тихомировские чтения : материалы междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 20–21 окт. 2022 г. / Белорус. гос. ун-т транспорта ; редкол.: А. А. Ерофеев (отв. ред.) [и др.]. – Гомель, 2023. – С 278–282.
2. Collins, Ted. Flywheel Energy Storage / Ted Collins, Steven A. Parker // Federal Technology Alert / U. S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy. – 2023. – N DOE/EE-0286. – 16 p.
3. Novel load forecasting and optimal dispatching methods considering demand response for integrated port energy system / Ruoli Tang [et al.] // J. of Marine Science and Engineering. – 2025. – Vol. 13. – N 3/421. – 26 p.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ ПО ВЕЛИЧИНЕ СОЛЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ИЗОЛЯТОРАХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

А. Н. Лесота, Д. А. Карпейчик, Я. А. Субоч, Н. С. Макаренко

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Научный руководитель Д. А. Секацкий

Массовые аварии на линиях воздушных электропередач (ЛЭП) в зимний период 2025–2026 гг. показали энергетической отрасли Республики Беларусь необходимость учета фактора солевых отложений на изоляторах. Наибольший ущерб получили линии, расположенные вблизи крупных магистралей и МКАДа. Все это из-за активной обработки дорог противогололедными реагентами на основе хлорида натрия и кальция. Соль, вступая в реакцию вместе с частичками бетона, пыли и сажи, оседает на изоляторах [1]. Вследствие этого на изоляторах ЛЭП образуется плотная корка, которая создает токопроводящие пути. Предлагаемое решение – снижение аварийных ситуаций в зимний период на линиях электропередач в Беларуси путем внедрения мониторинга солевых отложений на изоляторах; расчет и прогнозирование времени эксплуатации изоляторов с помощью математической модели тока утечки.

Ключевые слова: солевое загрязнение изолятора, мониторинг солевых отложений, математическая модель тока утечки, нормальный изолятор, загрязненный изолятор.

Для решения данной проблемы был произведен расчет токов утечки для нормального и загрязненного изоляторов. В качестве основного изолятора был выбран ПС-70Е, представленный на рис. 1.

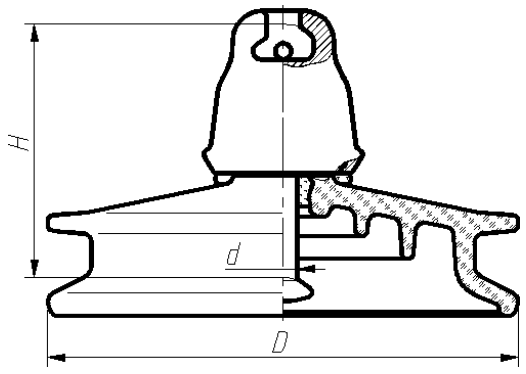


Рис. 1. Стеклянный двухкрылатый изолятор ПС-70Е

Основные характеристики для расчета тока утечки были взяты из паспортных данных изолятора ПС-70Е [2]:

– номинальное напряжение: $U_{\text{ном}} = 10$ кВ;

– рабочее трехфазное напряжение: $U = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} = 5{,}8$ кВ;

– длина пути утечки: $H = 303$ мм;

– диаметр тарелки изолятора: $D = 255$ мм;

– средний диаметр тарелки изолятора: $D_{\text{ср}} = 185$ мм;

– эмпирический коэффициент (для стекла): $k = 0{,}08$ мм;

– показатель степени: $m_{\text{NaCl}} = 0{,}95$ мм – эквивалентная толщина слоя поверхностной пленки раствора NaCl;

– критическая плотность загрязнения (70 %): $\gamma = 0{,}07$ мг/см^2.

Для II степени загрязнения атмосферы (СЗА) по ГОСТ 9920-89 плотность загрязнения будет принята: $\gamma = 0{,}01$ мг/см^2 [3].

Чтобы рассчитать ресурс через соль, найдем ток в плотности соли. Для этого будем использовать формулу связи тока I_h и плотности загрязнения γ [4]:

$$I_h = kU\gamma^m \frac{\pi D_{\text{ср}}}{H}.$$

Для нормального изолятора (ток утечки не вызывает деградаций и $\gamma = 0{,}01$ мг/см^2):

$$I_{h\text{норм}} = 0{,}08 \cdot 5\,800 \cdot 0{,}01^{0{,}95} \frac{3{,}14 \cdot 18}{30{,}3} = 9{,}5 \text{ мА}.$$

Для загрязненного изолятора ($\gamma = 0{,}06$ мг/см^2):

$$I_{h\text{з}} = 0{,}08 \cdot 5\,800 \cdot 0{,}06^{0{,}95} \frac{3{,}14 \cdot 18}{30{,}3} = 58{,}6 \text{ мА}.$$

Для рассчета ресурса изолятора используем математическую модель накопленного заряда [5]:

$$Q = I_h T,$$

где T – период в секундах. За 90 дней (три месяца зимы) $T = 90 \cdot 24 \cdot 3600 =$ 7 776 000 с.

Для разных видов изоляторов накопленный заряд имеет свое предельное значение, зависящее и от срока службы. Так, для данного изолятора ПС-70Е, выполненного из стекла, $Q_{\text{пред}} \approx 500\,000$ Кл за 30 лет службы.

Далее найдем затраты ресурса для нормального загрязнения, где $\gamma = 0{,}01$ мг/см^2:

$$Q_{\text{норм}} = 0{,}0095 \cdot 7\,776\,000 = 73\,872 \text{ Кл}.$$

За три месяца доля от общего ресурса нормального загрязнения:

$$w = \frac{73\,872}{500\,000} = 14{,}7744\ \%.$$

Полученный процент считается допустимым износом.

Теперь затраты ресурса загрязненного изолятора при $\gamma = 0{,}06$ мг/см^2:

$$Q_з = 0{,}0586 \cdot 777\,600 = 455\,673{,}6 \text{ Кл.}$$

За три месяца доля от общего ресурса сильного загрязнения:

$$w = \frac{455\,673{,}6}{500\,000} = 91{,}134\ \%.$$

Сравним два состояния изолятора:

Для изолятора, находящегося в нормальном состоянии, расходуется ресурс, который эквивалентен 0,25 части года (то есть трем месяцам).

Для загрязненного изолятора износ за то же фактическое время составил бы:

$$T_{экв} = \frac{Q_з}{I_{норм}} = \frac{455\,673{,}6}{0{,}0095} = 47\,965\,642{,}102 \text{ с} = 1{,}52 \text{ года.}$$

Данная формула показывает, что срок службы загрязненного изолятора снижается на 1,5 года.

Для обеспечения необходимой надежности изоляции нами предложена следующая методика для контроля и проверки состояния изолторов:

1. Динамическое зонирование по местам особой опасности (объекты и участки сети, которые наиболее подвержены отрицательному воздействию соли). Зонирование также будет учитывать время года и текущие погодные условия.

2. Внедрение специализированных датчиков мониторинга, которые будут измерять токи утечки и передавать данные о текущем состоянии изоляторов.

3. Плановые проверки с частотой, зависящей от ранее определенной зоны [6].

Таким образом, предложенная методика оценки остаточного ресурса изоляции по величине солевых отложений позволит точнее определять необходимость замены изоляторов на ЛЭП и предсказывать выход из строя воздушных линий.

Литература

1. Санитарные нормы, правила и гигиенические нормативы «Требования к содержанию территорий населенных мест, зон санитарной охраны источников водоснабжения, водоемов, пляжей» : СанПиН 2.1.3684-20. – Минск : Минздрав Респ. Беларусь, 2020. – 48 с. (в части применения противогололедных реагентов).
2. Изолятор линейный подвесной стеклянный ПС-70Е : ТУ 34-27-91-93. – Введ. 1993-01-01. – Минск : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1993. – 12 с.
3. Классификация степеней загрязнения атмосферы : межгос. стандарт. – Введ. 01.01.1991. – Минск : Белстандарт, 1990. – 6 с.
4. Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Нормы проектирования : ТКП 339-2022. – Введ. 01.07.2022. – Минск : Минэнерго, 2022. – 118 с.
5. Sumitomo Electric. DCIC-Q(t) Method for Evaluating Insulation Materials. – URL: https://global-sei.com/ (дата обращения: 17.03.2026).
6. Правила охраны линий электропередачи напряжением 220 кВ и выше : постановление Совета Министров Респ/ Беларусь от 28 сент. 2005 г. № 1074 (в ред. постановления от 15.06.2022 № 385) // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – Минск, 2022.