

УДК 519.718

**ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.
ASSESSMENT OF THE INSULATION
RELIABILITY OF ELECTRICAL EQUIPMENT**

А.В. Манько, Н.Ю. Подоба

Научный руководитель – А.Л. Старжинский, доцент
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
astarginsky@bntu.by

A. Manko, N. Podoba

Supervisor – A. Starzhinsky, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

***Аннотация:** В данной статье рассмотрены современные методы и технологии контроля надежности изоляции электрооборудования, включая такие методы как: метод оценки интенсивности частичных разрядов, испытания напряжением изоляции и измерение сопротивления изоляции.*

***Annotation:** This article discusses modern methods and technologies for monitoring the reliability of insulation of electrical equipment, including such methods as: a method for assessing the intensity of partial discharges, testing with insulation voltage and measuring insulation resistance.*

***Ключевые слова:** изоляция, надёжность, метод, разряд, напряжение, сопротивление, электрооборудование.*

***Key words:** isolation, reliability, method, discharge, voltage, resistance, electrical equipment.*

Введение

Надежность наиболее распространенного электрооборудования электроэнергетической системы, такого как, силовые трансформаторы, кабели, вводы, электрические машины в значительной степени определяется надежностью их изоляции. Электрическая прочность - основная характеристика изоляции электротехнических изделий, которая зависит от однородности материала. При нагревании токами нагрузок, температурных воздействиях внешней среды, механических нагрузках, низком качестве электроэнергии, при высоких напряжениях электрического поля происходит разрушение изоляции при функционировании электроустановки. Таким образом на срок службы изоляции влияет тепловое, механическое и электрическое старение изоляции.

Основная часть

Примерное распределение отказов опорных маслонаполненных и с литой изоляцией трансформаторов тока следующее: 31 - 48% - пробой литой изоляции, обрывы и замыкания вторичных обмоток, старение изоляции и усталостные явления, пробой бумажно-масляной изоляции; 18% - недостатки эксплуатации (попадание влаги и несвоевременная чистка изоляции, нарушение сроков испытаний и др.) ; 20-26 %- старение изоляции ; 8 – 10%- воздействие перенапряжений .

Отказы трансформаторов напряжения распределяются примерно так: воздействие перенапряжений – 51,9%; недостатки конструкции и изготовления (недостаточная герметичность, витковые замыкания и др.) – 22,9%; старение изоляции и износые явления – 12,3%; недостатки эксплуатации (плохой контроль уплотнений и воздухоосушителей, нарушение сроков ремонтов и испытаний и др.) – 12,9%.

Срок службы изоляции в зависимости от класса изоляции и температуры нагрева равен:

$$T_u = T_0 e^{-\gamma\theta}, \tag{1}$$

где T_0 – срок службы изоляции при температуре перегрева, равной 0;

γ – коэффициент, характеризующий степень старения изоляции в зависимости от ее класса;

θ – температура нагрева изоляции.

В смысле надежности все участки изоляции представляются системой с последовательным соединением элементов, поэтому функцию распределения времени безотказной работы такой системы или вероятность отказа можно представить в виде:

$$Q_c(t) = 1 - P_c(t) = [1 - Q(t)]^n. \tag{2}$$

В общем случае, когда $q(t)$ имеет так называемый «порог чувствительности», т.е. элемент гарантированно не откажет в интервале времени $(0; t_0)$, вероятность отказа изоляции имеет вид:

$$Q_c(t) = \begin{cases} 1 - e^{-c(t-t_0)}, & t \geq t_0 \\ 0, & t < t_0 \end{cases}. \tag{3}$$

где c – постоянный коэффициент. Форма этого закона определяется видом функции распределения на малых интервалах времени. Если зависимость изменения вероятности отказа на каждом интервале нелинейна, то вероятность отказа имеет следующий вид:

$$Q_c(t) = \begin{cases} 1 - e^{-c(t-t_0)^\alpha}, & t \geq t_0 \\ 0, & t < t_0 \end{cases}. \tag{4}$$

Если распределение не имеет порога чувствительности, t_0 , то вероятность отказа описывается законом Вейбулла:

$$Q_c(t) = \begin{cases} 1 - e^{-ct^\alpha}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}. \tag{5}$$

Частота отказов для данного случая (без порога чувствительности) равна:

$$\omega(t) = \begin{cases} \alpha ct^{\alpha-1} e^{-ct^\alpha}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (6)$$

а интенсивность отказов определяется как:

$$\lambda(t) = \alpha ct^{\alpha-1}. \quad (7)$$

Среднее время безотказной работы изоляции и дисперсия при распределении по закону Вейбулла равны:

$$\bar{T}_u = \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) c^{-\frac{1}{\alpha}}; \quad (8)$$

$$D(T_u) = c^{-\frac{2}{\alpha}} \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \right], \quad (9)$$

где Γ – гамма-функция[6].

При обычном осмотре изоляции не всегда возможно обнаружить мелкие трещины, воздушные включения, проникновение влаги, поэтому необходимо проводить периодические профилактические испытания и различные методы для оценки надёжности изоляции:

1. Метод оценки интенсивности частичных разрядов [1].

Перспективным методом контроля состояния изоляции электрооборудования высокого напряжения без его остановки является метод оценки интенсивности частичных разрядов, которые проявляются в виде искровых разрядов в различных частях изоляционной системы, а также в виде коронного разряда. Частичные разряды возникают в пустотах в твердой изоляции (бумажной или полиэтиленовой), а также в пузырьках газа (в случае жидкой изоляции), в большинстве случаев представляют собой воздушные или масляные промежутки в изоляции.



Рисунок 1 а) AR200 - анализ частичных разрядов в изоляции при помощи акустического датчика (AR 200); б) PD LOC — система точной локализации частичных разрядов в кабельных линиях

Для измерения частичных разрядов применяются специальные приборы следующих типов: AR — контроль ЧР в изоляции трансформаторов тока и напряжения (рисунок 1 а); PD LOC — система точной локализации ЧР в кабельных линиях (рисунок 1 б);

2. Акустический метод определения места повреждения кабельной линии [2].

С помощью акустического метода поиска повреждений кабеля можно обнаружить разнообразные виды повреждений, такие как "заплывающие" пробои, однофазные и междуфазные повреждения с различными переходными сопротивлениями, а также обрывы одной или нескольких жил. Однако при полном замыкании с низким переходным сопротивлением метод становится бесполезным. Иногда с помощью этого метода можно обнаружить несколько повреждений на одной кабельной линии.

Для определения местонахождения повреждения кабеля используется звуковой сигнал - щелчок или удар, который возникает при прохождении высоковольтного импульса через поврежденный участок. Этот звуковой сигнал передается через высокочувствительный акустический датчик (микрофон), который преобразует его в электрический сигнал. Переносное приемно-усилительное устройство, оснащенное звуковой и визуальной индикацией, позволяет оператору перемещать микрофон вдоль трассы кабеля и находить точку с максимальным сигналом, указывающим на место повреждения. Таким образом, локализуют место повреждения (рисунок 2).

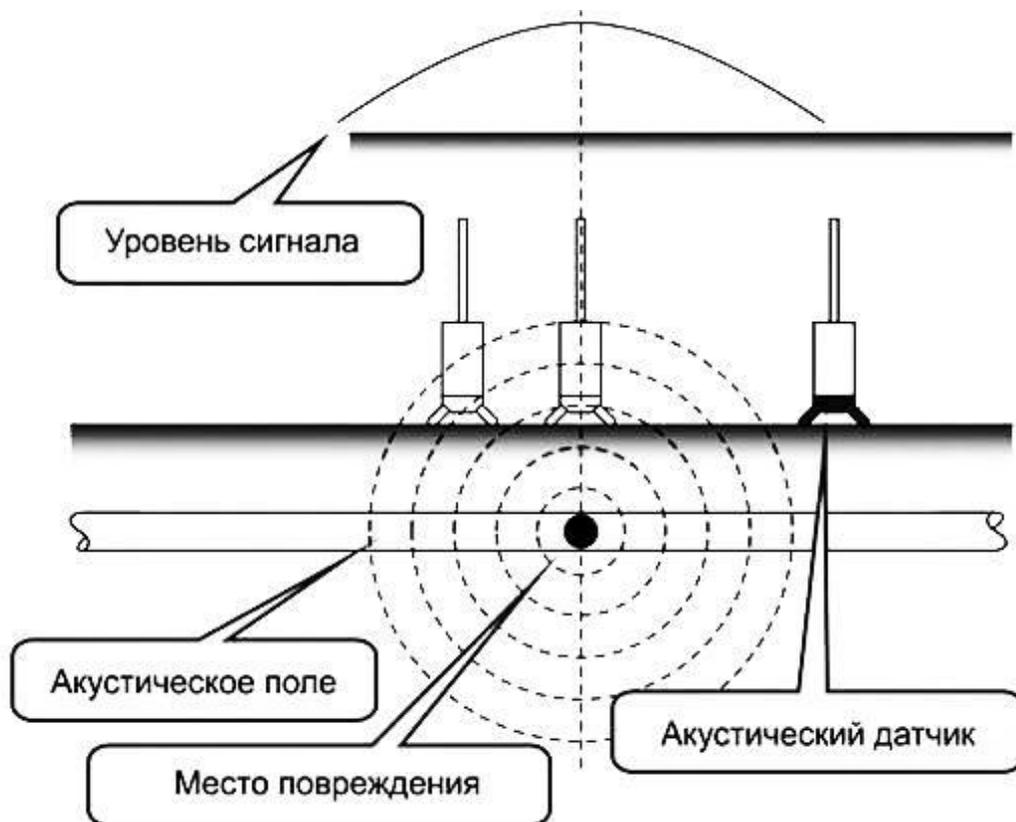


Рисунок 2 - Определение точного местонахождения повреждения в кабельной линии

3. Испытания напряжением [3]

Испытания изоляции повышенным напряжением проводят для определения электрической прочности изоляции и выявления возможных дефектов в изоляции.

Уровень испытательных напряжений электрооборудования при вводе его в эксплуатацию ниже заводских испытательных напряжений и составляет $0,9 \cdot U_{\text{исп.зав}}$. В качестве испытательного обычно используется напряжение промышленной частоты 50 Гц. Время продолжительности приложения испытательного напряжения ограничивается во избежание появления дефектов в изоляции и преждевременного старения ее от 1 мин до 5 мин.

Недостаток испытания выпрямленным напряжением - неравномерное распределение напряжения по толщине изоляции в зависимости от проводимости отдельных частей ее.

При испытаниях выпрямленным напряжением имеется возможность измерения токов утечки, являющихся дополнительным критерием оценки состояния изоляции. Испытания изоляции выпрямленным составляют от 10 до 20 мин. Когда испытание изоляции производится как переменным, так и выпрямленным напряжением, испытание выпрямленным напряжением должно предшествовать испытанию переменным напряжением.

Для проведения испытания повышенным напряжением переменного тока промышленной частоты используется повышающий трансформатор, у которого есть регулировочное устройство на стороне низкого напряжения. Схема установки также должна содержать выключатель питания с видимым разрывом и максимальную токовую защиту для отключения питания трансформатора в случае пробоя или перекрытия изоляции объекта. После установленной продолжительности испытания напряжение плавно снижается до значения, не превышающего одной трети испытательного, и отключается. Резкое снятие напряжения допускается в тех случаях, когда это необходимо для безопасности людей или сохранности оборудования. Под продолжительностью испытания подразумевается время приложения полного испытательного напряжения [4].

4. Измерения сопротивления изоляции [5]

Измерение сопротивления изоляции – это процедура определения сопротивления изоляции электрических оборудования, кабелей, проводов, электроники и других электрических устройств.

Метод основан на принципе передачи тока через изоляционный материал. При этом ток должен быть достаточно малым, чтобы изоляционный материал не был поврежден. Мегаомметр генерирует постоянное напряжение, которое прикладывается между измеряемым элементом и землей. Затем измеряется ток, протекающий через изоляцию. Измеряемое сопротивление вычисляется. Тестер изоляции, используемый в течение слишком короткого времени, фиксирует лишь емкостный зарядный ток и не будет показывать наличие загрязнений в изоляции. Ток, утекающий через поврежденную изоляцию в нетоковедущие металлические компоненты, называется током утечки. Однако для большей точности диагностики и техобслуживания также необходимо учитывать ток поглощения или поляризации. Некоторые тестеры сопротивления изоляции мож-

но запрограммировать так, чтобы необходимые испытания проводились с учетом всех видов тока.

Таблица 1 -. Рекомендованные значения испытательного напряжения и минимальной изоляции

Номинальное напряжение электрооборудования, В	Минимальное напряжение постоянного тока для проверки сопротивления изоляции, В	Рекомендованное минимальное сопротивление изоляции, МОм
250	500	25
600	1000	100
1000	1000	100
5000	2500	1000
15000	2500	5000

Заключение

Высокая надежность электротехнических устройств является необходимым условием эффективной работы различных автоматизированных систем, комплексов и оборудования, работающих в различных отраслях промышленности. С помощью современных методов и технологий можно более надежно контролировать состояние изоляции и предотвращать возможные аварии и поломки электрооборудования. В зависимости от целей изучения и возможностей исследователей выбирается наиболее удобный метод для определения надежности изоляции линий электропередачи.

Литература

1. Контроль частичных разрядов [Электронный ресурс]/контроль частичных разрядов. - Режим доступа: https://bstudy.net/657307/tehnika/kontrol_chastichnyh_razryadov/. - Дата доступа: 18.04.2023.
2. Акустический метод определения места повреждения кабельной линии [Электронный ресурс]/ акустический метод определения места повреждения кабельной линии - Режим доступа: https://angstrem.tech/blog/akusticheskiy_metod_opredeleniya_mesta_povrezhdeniya/. - Дата доступа: 20.04.2023
3. Испытания изоляции повышенным напряжением [Электронный ресурс]/ испытания изоляции повышенным напряжением - Режим доступа : <https://www.ruscable.ru/doc/documentation/instruction-16.html/>. - Дата доступа: 20.04.2023
4. Испытания повышенным напряжением переменного тока промышленной частоты [Электронный ресурс]/ испытания повышенным напряжением переменного тока промышленной частоты - Режим доступа: <https://electricalschool.info/main/naladka/708-ispytanie-izoljicii-povyshennym.html/>. - Дата доступа: 20.04.2023
5. Измерения сопротивления изоляции [Электронный ресурс]/ измерения сопротивления изоляции – Режим доступа : https://www.icsgroup.ru/library/publications/ommetr_choice/. - Дата доступа: 23.04.2023
6. Савина Н.В. Надёжность электроэнергетических систем: учебное пособие / Н.В. Савина. – Благовещенск: Амурский государственный университет , 2014. - 194 с.