

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СТАРЕНИЯ И ПОВРЕЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДКИ ЗДАНИЙ

Г.А. Гончаренко

*Рассмотрены основные показатели, определяющие надежность и безопасность обслуживания электропроводки зданий и сооружений. Приведены модели старения и накопления повреждения, позволяющие оценить остаточный ресурс и прогнозировать долговечность элементов электроустановки.*

*Ключевые слова: электропроводка, надежность, модели старения и повреждения, поляризация диэлектриков, пробой изоляции.*

Обеспечение высокой эксплуатационной надежности электропроводки является важной задачей при проектировании систем электроснабжения зданий и сооружений. Согласно действующей нормативной базы, в частности, [1], надежность электроустановок характеризуется определенной совокупностью свойств, к числу которых относятся:

- безотказность, определяемая такими показателями, как наработка на отказ  $T_0$ , вероятность безотказной работы  $Q_0(t)$ , параметр потока отказов  $\omega(t)$ ;
- долговечность, характеризуемая средними ресурсами между текущими  $\tau$ , капитальными ремонтами  $\tau_2$ , а также сроком службы до списания  $\tau_0$ ;
- ремонтоспособность, оцениваемая по средним значениям длительности проведения планово-предупредительных ремонтов (ППР): текущего  $T_1$ , капитального  $T_2$  и внепланового  $T_{вн}$ .

Кроме единичных показателей при оценке надежности электропроводки могут быть использованы комплексные, такие как коэффициент готовности

$$K_g \approx \frac{T_0}{T_0 + T_{вн}} \quad \text{и} \quad (1)$$

коэффициент технического использования

$$K_{т.и} \approx \frac{t_p(t_k)}{t_k}, \quad \text{где} \quad (2)$$

$t_p(t_k)$  – суммарная наработка или длительность работоспособного состояния электропроводки за календарный период  $t_k$ .

Коэффициенты  $K_g$  и  $K_{т.и}$  характеризуют как безотказность, так и ремонтпригодность, поэтому их удобно использовать при

анализе и оптимизации показателей надежности [2].

Основными факторами, определяющими надежность электропроводки, являются электрическая изоляция и состояние проводящих его элементов.

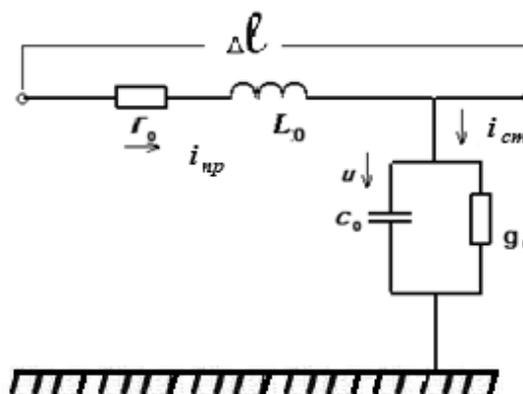


Рисунок 1 – Схема замещения электропроводки

Рассмотрим участок  $\Delta l$  электропроводки как линию с распределенными параметрами, описываемую уравнениями в частных производных:

$$-\frac{\partial u}{\partial l} = r_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial i}{\partial l} = g_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}$$

Здесь  $r_0$  и  $L_0$  – первичные параметры проводника электропроводки, обусловленные током проводимости  $i_{нр}$ ;

$g_0$  и  $C_0$  – первичные параметры изоляции с током смещения  $i_{см}$ .

Введем понятие комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_k = \epsilon' - j\epsilon''$ , где действительная часть  $\epsilon'$  представляет собой непо-

средственно диэлектрическую проницаемость, а мнимая  $\epsilon''$  - отражает потери.

Причем  $\epsilon'' = \frac{\gamma}{f} \cdot 1,8 \cdot 10^{10}$ , где  $\gamma = \omega \cdot \epsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$ ,

(См/м) – удельная объемная активная проводимость

В электропроводках, которые являются носителями электрического поля, происходят рассеяние (диссипация) энергии.

Рассеиваемую энергию за единицу времени (с) называют диэлектрическими потерями. Теряемая энергия преобразуется в теплоту, вызывая нагрев диэлектрика, вследствие чего ухудшаются его электрические характеристики. Вектор тока в изоляции электропроводки опережает по фазе вектор напряжения на  $\varphi < 90^\circ$ . Угол  $\delta$ , дополняющий  $\varphi$  до  $90^\circ$ , является углом диэлектрических потерь. В качестве параметра диэлектрика используется  $\operatorname{tg} \delta$  - тангенс угла диэлектрических потерь.

В переменном электрическом поле электропроводки можно выделить следующие виды диэлектрических потерь:

- 1) потери на электропроводность, обусловленные током смещения;
- 2) релаксационные потери, вызываемые замедленной поляризацией;
- 3) ионизационные потери при наличии в диэлектрике воздушных или иных газовых включений.

Полные диэлектрические потери в некотором образце диэлектрика ёмкостью С электропроводки, включенной под напряжение U с частотой 50 Гц, составят

$$P = U^2 \cdot 2\pi \cdot 50C \cdot \operatorname{tg} \delta \text{ (Вт)}. \quad (4)$$

Для оценки потерь в любой точке электропроводки с известным значением напряженности электрического поля E удельные диэлектрические потери могут быть определены по формуле:

$$P = E^2 \frac{f \cdot \epsilon_{\text{пр}} \cdot \operatorname{tg} \delta}{1,8 \cdot 10^{10}} \text{ (Вт/м}^3\text{)}, \quad (5)$$

где  $\frac{f \cdot \epsilon_{\text{пр}} \cdot \operatorname{tg} \delta}{1,8 \cdot 10^{10}} = \gamma_{\text{ср}}$  - удельная активная проводимость электропроводки (См/м) с параметрами  $\epsilon_{\text{пр}}$  и  $\operatorname{tg} \delta$ .

Способность изоляции электропроводки создавать диэлектрические потери в переменном поле  $\epsilon_{\text{пр}} \operatorname{tg} \delta$  будем называть коэффициентом диэлектрических потерь. Известно, что значение поверхностной проводимости диэлектрика зависит, в первую очередь, от относительной (а не абсолютной) влажности:

чем больше влаги адсорбирует поверхность, тем выше поверхностная электропроводимость.

Для диэлектриков электропроводки, эксплуатирующихся в сухих чистых помещениях, как правило, характерны высокие значения объёмного и поверхностного сопротивлений. Однако в условиях повышенной влажности диэлектрики могут сохранять достаточно высокие значения объёмного сопротивления, но поверхностное сопротивление всегда значительно ухудшается.

Таким образом, на величину поверхностного сопротивления изоляции электропроводки, эксплуатирующейся в условиях сельского хозяйства, оказывают влияние следующие факторы:

- 1) относительная влажность воздуха;
- 2) температура;
- 3) наличие агрессивной среды (химически активных загрязнений);
- 4) шероховатость поверхности;
- 5) давление атмосферы;
- 6) наличие водорастворимых примесей в материале диэлектрика;
- 7) чистота поверхности;
- 8) способность материала электризоваться;
- 9) химический состав и структура диэлектрика.

#### *Модель старения электрической изоляции электропроводки.*

Известно, что при воздействии параметров внешней среды (микроклимат, эксплуатационные нагрузки и т.п.) и электрического поля проводящих цепей в изоляции электропроводки могут возникать необратимые процессы. Изучению процессов разрушения изоляции электрооборудования посвящено множество работ, в том числе [3,4].

Представим условно модель старения изоляции в виде структурной схемы (рис.2).

К параметрам электрической изоляции относят объёмное сопротивление  $Z_{об}$  (объёмная проводимость  $Y_{об}$ ) изоляции.

Представим элемент электропроводки  $\Delta l$  в виде цилиндрического конденсатора (рис. 3).

Рассматривая искомое объёмное сопротивление электропроводки как результирующее сопротивление бесконечно тонких последовательно соединённых слоев толщиной  $dx$  и радиусом  $x$ , можно определить сопротивление изоляции такого слоя, как

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СТАРЕНИЯ И ПОВРЕЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДКИ ЗДАНИЙ



Рисунок 2 – Основные факторы, вызывающие старение изоляции.

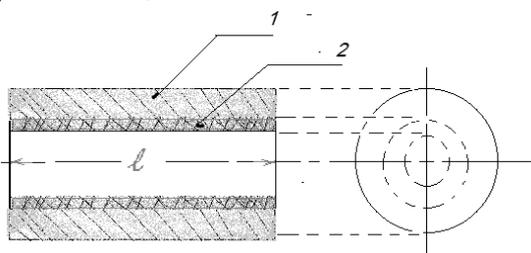


Рисунок 3 – Физическая модель электропроводки (1-диэлектрик; 2-электрод;  $r_1$  -внутренний радиус проводящей среды,  $r_2$  – внешний радиус элемента  $\Delta l$ ).

$$dZ_{об} = \int \frac{dx}{2\pi x \ell} \quad (6)$$

Интегрируя в пределах от  $x=r_1$  до  $x=r_2$ , получаем

$$Z_{об} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\rho}{2\pi x \ell} \frac{dx}{x} = \frac{\rho}{2\pi \ell} \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (7)$$

где  $\rho$  - удельное объемное сопротивление диэлектрика.

При рассмотрении в качестве электропроводки кабеля его объемное сопротивление изоляции  $\rho_H$  (между шиной и оболочкой, между двумя жилами и т.д.), отнесенное к единице длины кабеля, связано с величиной сопротивления кабеля  $Z$  на участке с длиной  $l$  соотношением

$$Z = \frac{\rho_H}{l}, \quad (8)$$

$$\text{Отсюда } \rho_H = Z \cdot l \quad (9)$$

Ток утечки  $I_{ym}$  (ток смещения) возникает при действии приложенного напряжения к диэлектрику (в нашем случае изоляции электропроводки). Ток утечки характеризует электропроводность диэлектрика. В свою очередь, диэлектрическая проницаемость характеризует способность материала создавать электрическую емкость.

Удельное сопротивление изоляции электропроводки определённого вида не является неизменным и зависит от целого ряда факторов: влажности, температуры, значения приложенного напряжения и т.п. Из всех климатических факторов, воздействующих на электрическую изоляцию, влияние повышенной влажности воздуха является наиболее доминирующим и чаще всего вызывает нарушение работоспособности электропроводок и выхода их из строя. Под действием влаги могут происходить изменения электрических, физико-механических и химических свойств изоляционных материалов.

Рассмотрим процесс старения изоляции (рис.2).

Известно [4], что при поглощении или конденсации влаги снижаются его объёмные или поверхностные сопротивления, растёт угол диэлектрических потерь, повышается диэлектрическая проницаемость, снижается электрическая плотность вследствие перераспределения электрического поля внутри изоляционного материала. Под действием повышенной влажности и одновременного электрического напряжения на поверхности изоляционного материала могут образовываться токопроводящие мостики. Во влажной атмосфере на поверхности изоляционного материала между зажимами, находящимися под разным электрическим потенциалом, образуется тонкая токопроводящая пленка. По этой пленке проходит незначительный ток, приводящий к ее нагреванию и высыханию. В том месте, где пленка высохла, ток прерывается и возникает искра, под действием которой происходит обугливание изоляции. С течением времени обугленные участки приводят к короткому замыканию. Вода, обладающая достаточно низким электрическим сопротивлением, вступая в соединения со многими веществами и образуя электролиты, становится хорошим проводником электрического тока, что усугубляет воздействие влаги на электрическую изоляцию.

Важнейшим свойством диэлектриков является их способность под воздействием внешнего электрического поля поляризоваться. При этом поляризация сводится к изменению расположения в пространстве электрически заряженных частиц диэлектрика.

Состояние диэлектрика, находящегося в электрическом поле, может быть описано напряжённостью поля  $E$  и поляризованностью (интенсивность поляризации  $\vec{P}$ ). Применительно к изоляции электропроводки, у которой диэлектрик однороден, величина напряжённости электрического поля в любой точке провода пропорционально напряжению питания и не зависит от диэлектрических свойств (диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ ). Интенсивность поляризации  $P$  можно рассматривать как величину, численно характеризующую явление поляризации диэлектрика во внешнем электрическом поле. При отсутствии этого поля каждый элемент некоторого объёма диэлектрика не имеет электрического момента, т.к. алгебраическая сумма зарядов во всех молекулах элемента равна нулю. Под воздействием внешнего электрического поля происходит упорядочение расположения в пространстве зарядов молекул диэлектрика. При этом рассматриваемый элемент диэлектрика будет иметь электрический момент, равный геометрической сумме  $\sum P$  моментов всех поляризованных молекул диэлектрика, находящегося в некотором объёме  $V$ . В этом случае поляризованность можно представить как

$$\vec{P} = \lim \frac{\sum P}{V} \quad (10)$$

#### *Изменение физико-механических свойств.*

При длительном воздействии повышенной влажности воздуха некоторые изоляционные материалы (пластмассы, полимерные, целлюлозные) разбухают. Влага проникает в глубину материала, происходит попеременное увлажнение и высыхание. В поверхностном слое образуются трещины, которые способствуют интенсивному проникновению влаги внутрь материала, при этом электрическая характеристика и механическая прочность изоляционного материала ухудшается.

#### *Изменение химических свойств.*

Известно [6], что высокая влажность вызывает гидролиз. Так, изоляционные лаки под воздействием влажной среды размягчаются с переходом в жидкое состояние. При этом выделяются органические кислоты, которые

способствуют интенсивной коррозии токопроводящих элементов электропроводки. Под воздействием высокой влажности может происходить разрушение кремнийорганических покрытий. При повышенной влажности воздуха в сельскохозяйственных помещениях (например, животноводческие фермы) могут создаваться благоприятные условия для появления на изоляционных материалах плесени. Выделяемые плесневыми грибами продукты жизнедеятельности разрушают органически электроизоляционные материалы. Плесень обладает свойством удерживать большое количество влаги, необходимой для ее жизнедеятельности. Последствия воздействия плесени могут быть более ощутимыми, чем воздействие просто повышенной влажности помещения.

Таким образом, из-за увлажнения, окисления и загрязнения поверхностных слоев электрической изоляции электропроводки создается заметная поверхностная электропроводность, в отношении которой диэлектрик характеризуется так называемым поверхностным сопротивлением [7].

*Тепловое старение.* Параметры электроизоляции при изменении в достаточно широких пределах температуры окружающей среды в большинстве случаев ухудшается. При повышении температуры в электроизоляционных материалах протекает ряд процессов, изменяющих их свойства. Эти процессы, определяемые прежде всего химическим составом и условиями работы изоляции в тепловом поле, могут быть весьма различны. Прежде всего при сохранении высокой механической прочности, неизменных геометрических размеров и формы изделия и т.п., электроизоляционные свойства проводок могут ухудшаться настолько, что сами по себе ограничат допустимую рабочую температуру материала.

#### *Пробой изоляции электропроводки.*

Как уже отмечалось, чем выше приложенное к изоляции напряжение, тем больше ток утечки и заряд образуемой изоляции ёмкости. Однако при увеличении напряжения может наступить такое состояние, когда ток проводимости через изоляцию резко возрастает: возникает пробой (Типичная вольт-амперная характеристика изоляции приведена на рис.4).

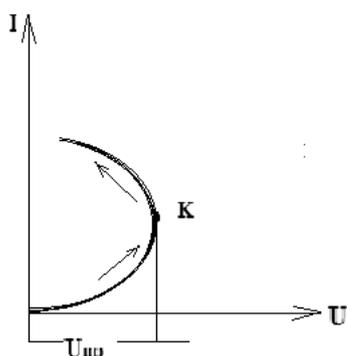


Рисунок 4 – Зависимость тока через изоляцию от напряжения на ней

Точка K графика, для которой  $\frac{dI}{dU} \rightarrow \infty$ , соответствует моменту пробоя; последнее снижение напряжения объясняется уменьшением сопротивления изоляции, т.к. при пробое образуются так называемые «проводящие каналы пробоя» или короткое замыкание. При этом возникает электрическая дуга, которая вызывает оплавление, обгорание и т.п. изменения диэлектрика. Таким образом, пробой изоляции электропроводки означает аварию, выход из строя электропроводки.

Будем различать два вида пробоя: электрический и электротепловой. Первый вид пробоя представляет непосредственное разрушение диэлектрика силами электрического поля. Электрический пробой протекает в результате взаимодействия с частицами диэлектрика ускоренных электрическим полем свободных заряженных частиц (электронов, ионов) или же в результате смещения связанных зарядов в диэлектрике под действием внешнего электрического поля. Для электрического пробоя характерны:

- 1) малое время развития пробоя (порядка микросекунд);
- 2) слабая зависимость электрической прочности  $E_{пр}$  и частоты приложенного напряжения и температуры.

В основе электротеплового пробоя лежит явление выделения тепла в диэлектрике, находящимся в электрическом поле, в виде диэлектрических потерь. В этом случае удельные диэлектрические потери могут быть определены по формуле [6]:

$$P = E^2 f \frac{\varepsilon \cdot tg \delta}{1.8 \cdot 10^{10}}, (Bm/m^3) \quad (11)$$

где  $\varepsilon \cdot tg \delta$  – коэффициент диэлектрических потерь.

При возрастании температуры выделение тепла и удельной проводимости  $g$  в ди-

электрике возрастает. Процесс идет монотонно до тех пор, пока диэлектрик не разогреется настолько, что он будет поврежден (расплавлен, обуглен, пронизан трещинами).

#### *О модели накопления повреждений электропроводки.*

Изучение физико-химических закономерностей разрушения электроизоляции и повреждения электропроводки сопряжено с большими трудностями теоретического и экспериментального порядка: эти трудности вызваны многообразием случайных факторов внешней среды, имманентными свойствами диэлектрика и проводников, условиями эксплуатации и т.п.

В настоящее время общепризнанным, объясняющим физические механизмы старения и разрушения материалов, является кинетический подход, в основе которого лежит признание того факта, что разрушение не может произойти мгновенно, а представляет собой процесс, протекающий во времени. Длительность этого процесса в конечном счете определяется временными характеристиками отдельных микроэлементов, ограничивающих своим движением устойчивость и надежность в целом всей электропроводки по отношению к различным внешним нагрузкам.

В основе кинетического подхода лежит термомеханическая и диффузионная концепции надежности и разрушения [7]. Сущность первой концепции состоит в том, что при температурах, отличных от абсолютного нуля, микроэлементы материала (проводника или диэлектрика) находятся в состоянии непрерывных тепловых колебаний относительно равновесного устойчивого положения. Вследствие хаотического характера теплового движения всегда имеется отличная от нуля вероятность того, что какой-то элемент случайно приобретет энергию, превышающую энергию связи, и не вернется в своё равновесное положение, т.е. произойдет элементарный акт разрушения и возникнет вследствие этого элементарное повреждение материала. Если при этом имеется какое-либо внешнее воздействие, то происходит уменьшение энергии связи, что, в свою очередь, вызовет повышение частоты флуктуаций, приводящих к дальнейшему возникновению элементарных повреждений, т.е. воздействие внешних факторов инициирует процесс накопления повреждений.

Сущность второй концепции о физической природе разрушения состоит в том, что

перемещение микроэлементов, которое может привести к накоплению повреждений, рассматривается как дислокации. При ненулевой температуре имеет место хаотическое движение дислокаций в материале. Воздействие внешних факторов вызывает диффузию (дрейф) в определенном направлении, которая вначале носит обратимый характер. С течением времени при возрастании внешних нагрузок начинается скольжение и группирование дислокаций, возникает необратимый процесс, приводящий к разрушению материала.

Изучение физических закономерностей накопления повреждения при учете различных внешних факторов позволяет разработать физические модели разрушения изоляции и проводников электропроводки. При этом основным показателем надежности материалов может быть принята долговечность. Наибольший интерес здесь представляет анализ и прогнозирование остаточного ресурса электропроводки в условиях комплексного воздействия электрических, тепловых, механических внешних нагрузок. Принимая во внимание, что построение теоретических моделей представляет значительную сложность из-за недостаточной изученности физических механизмов старения и разрушения электропроводки, представляется целесообразным получение таких моделей с помощью экспериментальных исследований. По результатам

натурных испытаний можно построить прогностическую зависимость долговечности в области реальных значений нагрузки и оценить основные параметры, характеризующие свойства электропроводки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 27.001-2009. Надежность в технике. Система управления.
2. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.М., Соловьев А.Д. Математические методы и теории надежности. Вып.95. М.:Наука, 1980.
3. Бёнинг П. Электрическая прочность электроизоляционных материалов. Перевод под ред. А.А. Воробьева М.Л., Госэнергоиздат, 1960.
4. Тареев Б.П., Казарновский Д.М. Испытания электроизоляционных материалов. М.-Л. Госэнергоиздат, 1969.
5. Берлинер М.А. Электрические измерения, автоматический контроль и регулирование влажности. М.: Энергия, 1985.
6. Богородицкий Н.П., Воробьев А.А., Тареев Б.П. Теория диэлектриков. М.: Энергия, 1965.
7. Ллойд Д., Липов М. Надежность. М.: Советское радио, 1964.

*Гончаренко Георгий Александрович – аспирант кафедры «Электрификации производства и быта» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова*