

## ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕЙНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ ДЛЯ КОНТАКТНЫХ СЕТЕЙ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Проведенням числових досліджень на математичних моделях стаціонарного електричного поля співставлені основні електричні характеристики ізолюючих підвісок з фарфорових та полімерних ізоляторів для контактних мереж змінного та постійного струму.

Проведением численных исследований на математических моделях стационарного электрического поля сопоставлены основные электрические характеристики изолирующих подвесок из фарфоровых и полимерных изоляторов для контактных сетей переменного и постоянного тока.

On the base of numeric investigations on mathematical models of stationary electric field the basic electric performances of insulating suspensions from porcelain and polymeric insulators for contact nets of alternating and direct current are compared.

В контактных сетях железных дорог в настоящее время наряду с фарфоровыми тарельчатыми изоляторами все шире применяются полимерные стержневые изоляторы, что обусловлено их высокой устойчивостью к специфическим эксплуатационным воздействиям. Выбор полимерных изоляторов и гирлянд из тарельчатых изоляторов осуществляется по одним и тем же критериям: по минимальной длине пути утечки и по величинам выдерживаемых перенапряжений при различных внешних условиях.

Изоляторы большее количество времени эксплуатируются в нормальных условиях, при которых напряжение в сети не превышает наибольшего нормированного значения и сами изоляторы находятся в слабо загрязненном и увлажненном состоянии. В таких условиях заведомо принимается, что изоляторы целиком выполняют изолирующую функцию, поэтому диэлектрические свойства изоляторов в нормальном режиме работы не рассматривались. Вместе с тем, поскольку срок службы изоляторов составляет 25...30 лет и более, то вполне допустимо, что за счет эффекта накопления воздействующих факторов изоляторы постепенно могут утрачивать свои изолирующие свойства. Поэтому будущее состояние изоляции в процессе эксплуатации может зависеть от их статических характеристик, таких как сопротивление изоляции и соответствующие токи утечки, напряженность электрического поля. Очевидно также, что названные статические характеристики изоляции могут в той или иной степени повлиять на технико-экономические показатели самой сети.

В нормальных условиях электростатические процессы на изоляторах настолько слабы, что их количественно определить экспериментальным путем практически не представляется возможным. Поэтому в настоящей работе авторами сделана попытка определить электрические характеристики изоляторов в нормальном режиме их работы путем математического моделирования электрического поля изоляторов. Зная распределения электрического поля, несложно установить интересующие нас характеристики изоляции.

Квазистационарное электрическое поле в рассматриваемой области  $\vec{r} \in V$  описывается дифференциальным уравнением, в общем случае, с комплексной проводимостью вида [1]:

$$\operatorname{div}\{(\gamma + j\omega\epsilon\epsilon_0)\operatorname{grad}\varphi\} = 0, \quad (1)$$

где  $\omega$  – угловая частота;

$\epsilon\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость;

$j$  – комплексная единица;

$\varphi$  – искомый потенциал;

$-\operatorname{grad}\varphi = \vec{E}$  – вектор напряженности поля.

Уравнение (1) дополняется граничными условиями на поверхностях раздела подобластей и на границе расчетной области. На поверхности раздела подобластей  $S = S_i \cup S_y$  задаются известные потенциалы и токи, а также принимаются условия непрерывности тока и равенство потенциалов:

$$(\gamma + j\omega\epsilon\epsilon_0)^i \vec{E}^i = (\gamma + j\omega\epsilon\epsilon_0)^y \vec{E}^y; \quad (2)$$

$$\varphi^i = \varphi^y. \quad (3)$$

Приближенное интегрирование уравнения (1) осуществляется на основе проекционно-сеточного метода Галеркина [2]. Расчетная область  $V$  представляется объединением конечных непересекающихся элементов  $V_e$ , а искомым потенциал в виде сумм потенциалов  $\varphi_i$  в каждом узле элементов:

$$\varphi = \sum_{e=1}^{N_e} \varphi_e = \sum_{e=1}^{N_e} \sum_{i=1}^{N_p} L_i \varphi_i, \quad (4)$$

здесь  $L_i$  – базисная функция, определенная в  $i$ -том узле элемента  $V_e$ ;

$N_e, N_p$  – число элементов и узлов соответственно.

Подставляя выражение (4) в исходное уравнение (1), получаем систему линейных алгебраических уравнений относительно узловых потенциалов:

$$\int_{V_e} \operatorname{div} \{ (\gamma + j\omega\epsilon\epsilon_0) \operatorname{grad} L_i \} L_k \varphi_i dv = 0, \quad (5)$$

где  $e = 1, N_e$ ;  $i, k = 1, N_p$ .

По результатам расчета поля вычисляется полный ток, его резистивная и емкостная составляющие интегрированием плотности тока (2) по всему объему  $V$ :

$$I_\Sigma = I_R + jI_C = \int_V (\gamma + j\omega\epsilon\epsilon_0) \vec{E} dv. \quad (6)$$

При известных токах расчетную область можно представить в виде схемы замещения из  $R$ - $C$  параллельной цепочки, величины которых определяем делением приложенного напряжения  $U$  на соответствующие токи. Таким образом, устанавливаются полное сопротивление изолирующей системы и значения элементов схемы замещения,  $R$  и  $C$ .

В качестве примера были рассмотрены две равноценные изолирующие подвески для сети переменного тока с наибольшим номинальным напряжением 27,5 кВ. Одна подвеска составлена из 4-х последовательно соединенных фарфоровых изоляторов типа ПФ70Д, а другая – из одного полимерного изолятора типа ПСКЦ120/27,5-5.

В нормальных внешних условиях поверхность изоляции характеризуется относительно высоким электрическим сопротивлением. Для определенности принимаем, что изоляция независимо от физических свойств материала загрязняется равномерно по всей поверхности с удельной проводимостью  $\gamma_3 \leq 10^{-8}$  См.

Исходные геометрические и диэлектрические параметры подвески, принятые в расчетах, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры подвесок

Наименование параметров	Подвеска ПФ70Д×4	Подвеска ПСКЦ120/27,5-5
Расстояние траверса – токопровод, мм	768	
Длина изоляционной части, мм	400	404
Длина пути утечки, мм	1200	1200
Диаметр юбки изолятора, мм	255	129/91 (29 – диаметр цилиндрической части)
Коэффициент формы изоляции	0,72×4	7,4
Удельная проводимость диэлектрика, См/м	$1 \times 10^{-12}$	$1 \times 10^{-12}$ – стержень $1 \times 10^{-12}$ – оболочка
Относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика	7,0	5,0 – стержень 4,0 – оболочка
Удельная поверхностная проводимость диэлектрика, См	$1 \times 10^{-14}$ ; $1 \times 10^{-12}$ ; $1 \times 10^{-10}$ ; $1 \times 10^{-8}$	

Потенциал верхнего заземленного металлического элемента изоляции принимаем равным нулю, а потенциал нижней части металличе-

ского элемента –  $U_{н.р.}$ , наибольшему рабочему напряжению сети, равному 27,5 кВ.

В общем случае система уравнений (5) решается в трехмерной координатной системе. Существует различные программные средства, реализующие аналогичные задачи на персональных компьютерах: «Cosmos», «ANSYS», «Зенит», «Приз» и др. Как показывает практика расчетов, приведение исходной задачи к осесимметричной посредством представления токопровода и траверсы эквивалентными дисками или тороидами существенно упрощает решение задачи, при этом удается получить все практически полезные данные. Такое упрощение в нашем случае оправдано еще и тем, что в первую очередь интерес представляет соотношение между характеристиками двух альтернативных изолирующих подвесок, находящихся в идентичных условиях. Учет поверхностного сопротивления изоляции осуществляем введением условно тонкого слоя с удельной проводимостью  $\gamma_3$ , при этом пренебрегаем падением напряжения по толще слоя, как это предложено в [3, 4]. Тогда в расчет принимаются только составляющие электрического поля, ориентированные вдоль поверхности этого слоя, и общая структура уравнений (5) сохраняется без изменений.

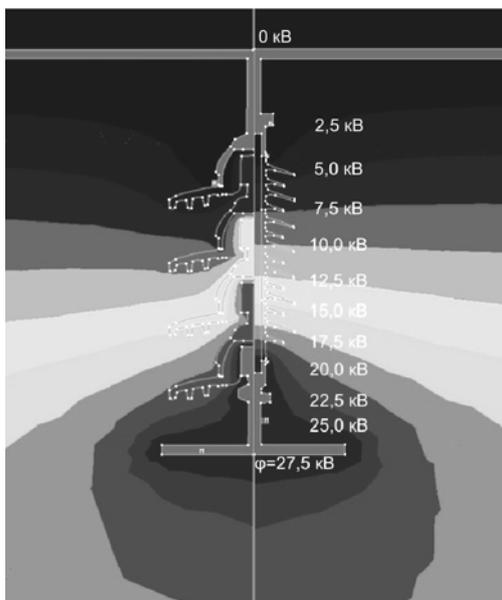


Рис. 1. Линии равного потенциала изолирующих подвесок

Наличие металлических элементов в гирлянде с неизвестными потенциалами в первой подвеске вносит дополнительную сложность в численных расчетах. Для того, чтобы избежать громоздких итерационных вычислений с непрогнозируемым исходом, предложено металлические элементы «внутри» гирлянды задавать в виде отдельных диэлектрических подоб-

ластей с удельной проводимостью большей, чем на 5 и более порядков по сравнению со смежными подобластями.

На рис. 1 показан один из примеров расчета поля для случая  $\gamma_3 = 1 \times 10^{-10}$  См, представленный в виде линий равных потенциалов. Левая половина рисунка соответствует гирлянде из фарфоровых изоляторов, а правая – подвеске с полимерным изолятором. Приведенный рисунок дает общее представление о том, что полимерный изолятор нагружен электрически значительно равномернее, чем фарфоровые изоляторы. При этом линии равных потенциалов заметно гуще располагаются на фарфоровых изоляторах.

Действительно, активная составляющая токов утечки вдоль гирлянды из фарфоровых изоляторов значительно больше, чем у полимерного изолятора, и, как показано на рис. 2, для  $\rho = 1/\gamma_3 \geq 10^{11}$  Ом соотношение между токами может превышать 10...100 раз, хотя следует заметить, что наибольшая величина тока не превышает единиц микроампер.

С увеличением поверхностной проводимости изоляции разница в токах существенно сокращается, а величина токов составляет уже десятки микроампер (табл. 2).

Токи смещения приведены на рис. 2 (обозначены цифрами 1 и 2), что соответствуют расчетным значениям эквивалентных емкостей:

- 18,2 пФ – для подвески из гирлянды фарфоровых изоляторов;
- 6,8 пФ – для подвески из полимерного изолятора.



Рис. 2. Токи утечки в сети переменного тока: 1, 3 – токи смещения и проводимости подвески из ПФ70Д; 2, 4 – токи смещения и проводимости подвески из ПСК120/27,5-5

По данным табл. 2 можно судить, что разность потенциалов, приходящаяся между шапкой и стержнем на нижнем фарфоровом изоляторе, на 6...9 % больше, чем на других изоляторах. По мере увеличения поверхностной про-

водимости отмечается тенденция выравнивания разности потенциалов на изоляторах.

Максимумы напряженности поля,  $E_m$ , имеют место в области потенциального электрода. Для первой подвески точки  $E_m$  находятся на стыке «стержень с цементной связкой – фар-

фор», для второй подвески – по границе «оконцеватель – защитная оболочка». Численные значения максимальной напряженности поля даны на рис. 3, откуда видно, что  $E_m$  на фарфоре больше примерно в два раза, чем на полим-

Таблица 2

Электрические характеристики подвесок

Наименование показателей		Удельная поверхностная проводимость, См			
		$1 \times 10^{-14}$	$1 \times 10^{-12}$	$1 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-8}$
Эквивалентное сопротивление, МОм	Подвеска из ПФ70Д×4	21 400	20 700	5 860	250
	Подвеска из ПСКЦ120/27,5-5	246 000 000	2 430 000	28 500	736
Ток проводимости, мкА	Подвеска из ПФ70Д×4	1,29	1,33	4,69	110
	Подвеска из ПСКЦ120/27,5-5	0,00 011	0, 011	0,97	37,4
Напряжение на изоляторе в подвеске из ПФ70Д×4, кВ	На 1-ом от траверсы	6,84	6,84	6,85	6,89
	На 2-ом от траверсы	6,60	6,60	6,60	6,74
	На 3-ем от траверсы	6,75	6,75	6,74	6,86
	На 4-ом от траверсы	7,31	7,31	7,31	7,01

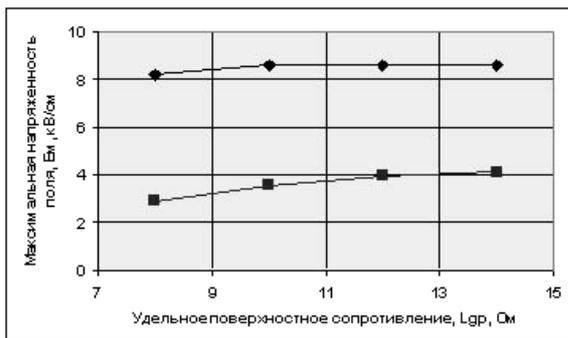


Рис. 3. Зависимость максимальной напряженности поля от величины поверхностного сопротивления изоляции подвески:

1 – из ПФ70Д; 2 – из ПСКЦ120/27,5-5

Токи утечки вдоль изоляции можно условно представить как сумму токов, протекающих через тело изолятора и по его поверхности. Соответственно резистивное сопротивление – в виде параллельно соединенных поверхностного ( $R_s$ ) и объемного сопротивлений ( $R_v$ ):

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_v}. \quad (7)$$

Объемное сопротивление не зависит от внешних условий, поэтому величина его будет близка величине общего сопротивления изоля-

ции для случая, когда изоляторы находятся в сухом и чистом состоянии:

$$R_v \cong R \left( \gamma_3 \cong 1 \times 10^{-14} \text{ См} \right).$$

На практике при выборе внешней изоляции используют так называемый коэффициент формы изоляционной конструкции. Этот коэффициент определяет поверхностное сопротивление изоляции следующим образом:

$$R_s = \frac{1}{\pi \cdot \gamma_3} \int_0^L \frac{dl}{D(l)} = \frac{k_\phi}{\gamma_3}, \quad (8)$$

где  $dl$  – приращение длины пути утечки  $L$ ;

$D(l)$  – диаметр изолятора;

$k_\phi$  – коэффициент формы изолятора (см. табл. 1).

Очевидно, что соотношения (7) и (8) в большей мере справедливы для системы постоянного тока, когда емкостные токи можно не учитывать. Были выполнены расчеты изолирующих подвесок для сети постоянного тока по аналогии, что и для случая с переменным током. На рис. 4 сопоставлены активные сопротивления подвесок сети постоянного тока, вычисленные на основе моделей электрического поля (5), но для  $\omega = 0$  и по величинам коэффициента форм использованных изоляторов (8):

$k_{\phi 1} = 0,72 \times 2$  для ПФ70Д×2 и  $k_{\phi 2} = 3,9$  для ПСКЦ120/3,3-7.



Рис. 4. Сопротивления изолирующих подвесок сети постоянного тока: 1, 2 – из ПФ70Д×2; 3, 4 – из ПСКЦ120/3,3-7; 1, 3 – по (1); 2, 4 – по (8)

Зависимости на рис. 4 свидетельствуют о хорошей сходимости сравниваемых величин сопротивлений изоляции. Откуда вытекает, что в сетях постоянного тока для подвески с полимерными изоляторами вследствие их большого объемного сопротивления ( $R_V \approx 1 \times 10^{14}$  Ом) токи утечки целиком определяются поверхностным сопротивлением изолятора:  $R \cong R_S$  (7). Для подвески с фарфоровыми изоляторами объемное сопротивление оценивается величиной  $R_V \leq 1 \times 10^{11}$  Ом. Поэтому, как видно из рис. 4, можно пренебречь токами сквозь тело диэлектрика, если поверхностное загрязнение составляет  $\gamma_3 \geq 1 \times 10^{-10}$  См.

Таким образом, можно констатировать, что в рассматриваемых условиях эксплуатации в сетях постоянного тока токи утечки вдоль полимерной изоляции по сравнению с токами вдоль фарфоровой изоляции будут меньше, по крайней мере, во столько раз, во сколько отличаются коэффициенты формы используемых изоляторов:  $k_{\phi 2} / k_{\phi 1} = 2,8$  (рис. 5). По сути, последний вывод относится и к изоляции переменного тока.

Уместно отметить, что проведенный здесь анализ предполагал равенство восприимчивости сравниваемой изоляции к загрязнению и увлажнению. В действительности, как подтверждает опыт работы, полимерные изоляторы вследствие высокой гидрофобности при одинаковых внешних условиях загрязняются значительно меньше, поэтому реальные токи утечки по полимерным изоляторам окажутся значимо меньше, чем спрогнозировано в данной работе.



Рис. 5. Токи утечки в сети постоянного тока ( $U_{н.р.} = 4$  кВ) вдоль изоляции из: 1 – ПФ70Д×2; 2 – ПСКЦ120/3,3-7

## Выводы

В нормальном режиме работы, в условиях слабых загрязнений и в периоды невысокой влажности атмосферы, стержневые полимерные изоляторы значительно слабее подвергаются электрическим воздействиям по сравнению с гирляндами из тарельчатых фарфоровых изоляторов, что обусловлено только лишь их конструктивными особенностями.

В условиях загрязненности изоляции, характеризующейся удельной поверхностной проводимостью  $\gamma_3 \geq 1 \times 10^{-10}$  См, оценку токов утечки можно осуществлять по коэффициентам формы изоляторов.

В рассматриваемых условиях в контактной сети замена фарфоровых изоляторов эквивалентными полимерными приведет к снижению токов утечки через изолирующие подвески в 3 и более раз.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нейман, Л. Р. Теоретические основы электротехники [Текст]. – Т. 2 / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчан. – Л.: Энергия, 1981. – С. 416.
2. Цыбенко, А. С. Модифицированный метод Краута для решения системы линейных алгебраических комплекснозначных уравнений высокого порядка [Текст] / А. С. Цыбенко // Проблемы прочности. – К., 1986. – № 2. – С. 110-112.
3. Ким, Е. Д. Влияние влажности воздуха на электрическое поле изолятора. [Текст] / Е. Д. Ким // Вестник ХГПУ «ХПИ». – 1998. – Вып. 13. – С. 96-100.
4. Кім, Є. Д. Дослідження електричного поля ізоляційної конструкції з тонкими протяжними підобластями [Текст] / Є. Д. Кім, В. Л. Калмиков // Вісник Слов'янського держ. пед. ун-ту. – 2005. – Вип. 1. – С. 62-68.

Поступила в редколлегию 24.03.2009.