

Электростатические характеристики линейных изоляторов для контактных сетей железных дорог

Ким Ен Дар, д. т. н., В.Г. Сыченко, к.т.н., В.Л. Калмыков, инж.

Проведением численных исследований на математических моделях стационарного электрического поля сопоставлены основные электрические характеристики изолирующих подвесок из фарфоровых и полимерных изоляторов для контактной сети переменного тока. Установлено повышенное электрическое сопротивление подвески из полимерных изоляторов в условиях слабой загрязненности и увлажненности атмосферы. Например, при внешних условиях, характеризуемых удельной поверхностной проводимостью изоляции 10^{-10} См, эквивалентные параметры подвески из фарфоровых изоляторов составили 5,86 ГОм и 18,2 пФ, а подвески из полимерного изолятора: 28,5 ГОм; 6,8 пФ. Данное преимущество подвески из полимерного изолятора обусловлено стержневой конструкцией изолятора.

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 принимаются, 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]:

$$\text{EMBED Equation.3 } \operatorname{div} \{ (\gamma + j\omega\epsilon\epsilon_0) \operatorname{grad} \varphi \} = 0, \quad (1)$$

где ω - угловая частота;

$\epsilon\epsilon_0$ - диэлектрическая проницаемость;

j - комплексная единица;

φ - искомый потенциал;

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

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

$$(\gamma + j\omega\varepsilon\varepsilon_0)\vec{E}^i = (\gamma + j\omega\varepsilon\varepsilon_0)\vec{E}^j, \quad (2)$$

$$\varphi^i = \varphi^j \quad (3)$$

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

$$\int_{V_e} \text{div} \{ (\gamma + j\omega\varepsilon\varepsilon_0) \text{grad} L_i \} L_k \varphi_i dv = 0, \quad (5)$$

где $e = 1, N_e; i, k = 1, N_p$

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

$$I_\Sigma = I_R + jI_C = \int_V (\gamma + j\omega\varepsilon\varepsilon_0) \vec{E} dv \quad (6)$$

При известных токах расчетную область можно представить в виде схемы замещения из R-С параллельной цепочки, величины которых определяем делением приложенного напряжения U на соответствующие токи. Таким образом, устанавливаются полное сопротивление изолирующей системы, 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 $\gamma_3 \leq 10^{-8} \text{См}$.

Исходные геометрические и диэлектрические параметры подвески, принятые в

расчетах, приведены в таблице 1.

Таблица 1

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)
Удельная проводимость диэлектрика, См/м	1×10^{-12}	1×10^{-12} -стержень 1×10^{-12} -оболочка
Относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика	7,0	5,0-стержень 4,0-оболочка
Удельная поверхностная проводимость диэлектрика, См	1×10^{-14} ; 1×10^{-12} ; 1×10^{-10} ; 1×10^{-8}	

Потенциал верхнего заземленного металлического элемента изоляции принимаем равный нулю, а потенциал нижней части металлического 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 γ_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.

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 подобластей с удельной проводимостью большей, чем на

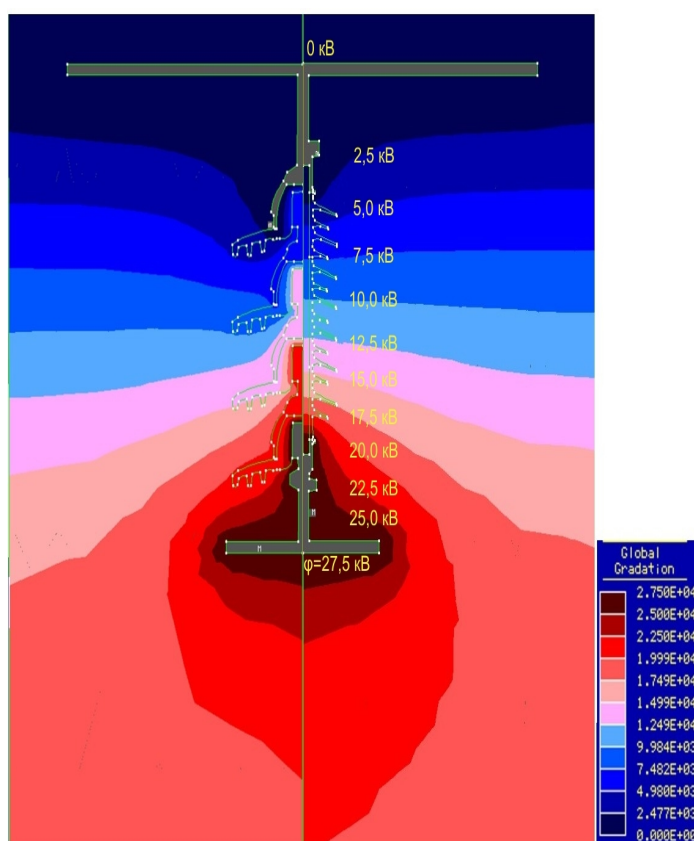


Рис. 1. Линий равного потенциала изолирующих подвесок

5 и более порядка 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 к гирлянде из фарфоровых изоляторов, а правая – к подвеске с полимерным изолятором. Приведенный рисунок дает общее представление о том, что полимерный изолятор нагружен электрически значительно равномернее, чем фарфоровые изоляторы. При этом линий 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.

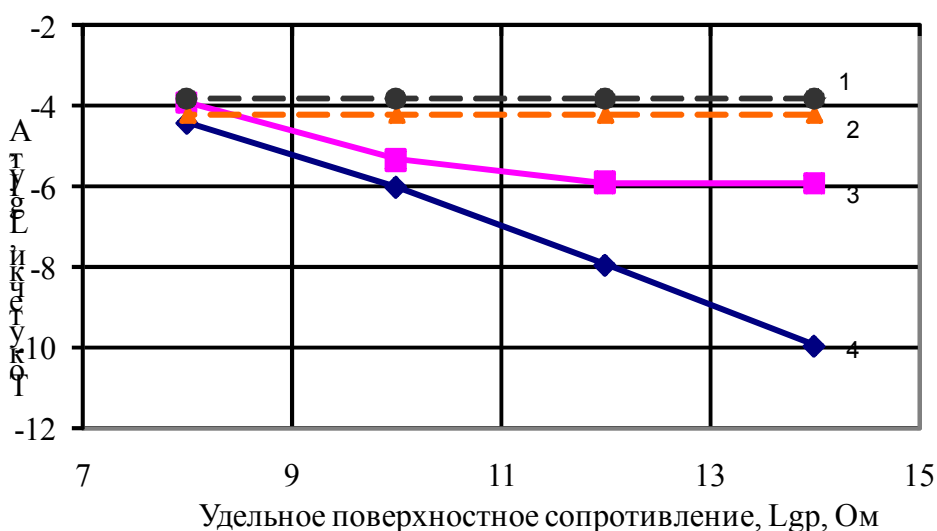


Рис. 2. Зависимости токов утечки от величины поверхностного сопротивления изоляции: 1, 2-токи смещения подвески из ПФ70Д и ПСК120/27,5-5 соответственно; 3,4-токи проводимости подвески из ПФ70Д и ПСК120/27,5-5 соответственно

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

Таблица 2

Наименование показателей		Удельная поверхностная проводимость, См			
		1×10^{-14}	1×10^{-12}	1×10^{-10}	1×10^{-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	На 1-ом от траверсы	6,84	6,84	6,85	6,89

подвеске из ПФ70Д×4, кВ	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

По данным таблицы 2 можно судить, что разность потенциалов, приходящей между шапкой и стержнем на нижнем фарфоровом изоляторе на 6-9% больше чем на других изоляторах. По мере увеличения поверхностной проводимости 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 связки – фарфор, 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 полимере.

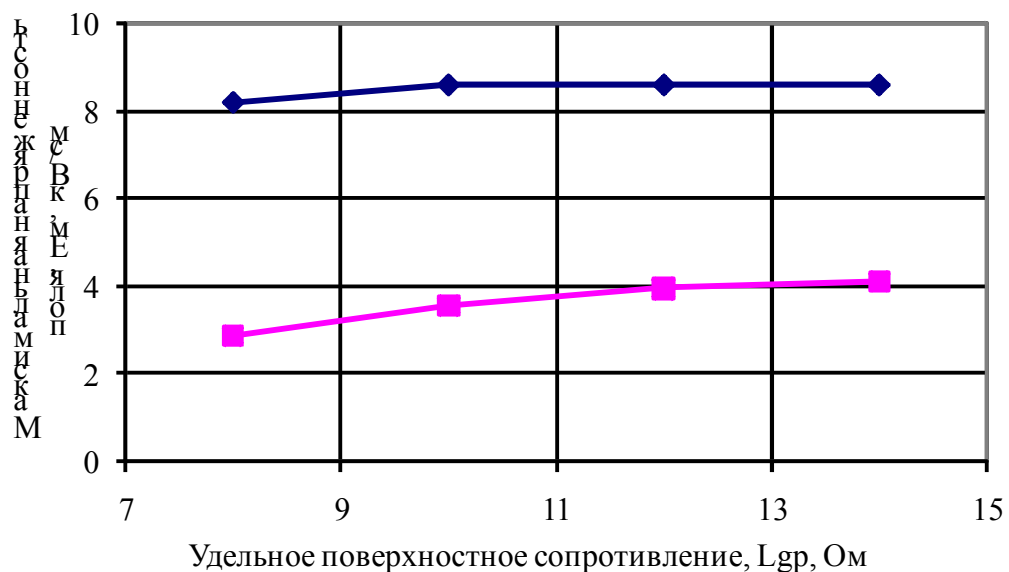


Рис. 3. Зависимость максимальной напряженности поля от величины поверхностного сопротивления изоляции подвески: 1- из ПФ70Д; 2- из ПСКЦ120/27,5-5

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 рассматриваемых условиях в контактной сети переменного напряжения замена фарфоровых изоляторов эквивалентными полимерными приведет к снижению токов утечки через изолирующие подвески в три и более раза.

Литература

1. Нейман Л. Р., Демирчан К. С. Теоретические основы электротехники. Том 2. –Л.: Энергия,-1981.-С. 416;
2. Цыбенко А. С. Модифицированный метод Краута для решения системы линейных алгебраических комплекснозначных уравнений высокого порядка // Проблема прочности.- 1986.-№2, с. 110-112;
3. Ким Ен Дар. Влияние влажности воздуха на электрическое поле изолятора. // Вестник ХГПУ «ХПИ».- 1998.- Выпуск 13.- с. 96-100.
4. Кім Єн Дар, Калмиков В. Л. Дослідження електричного поля ізоляційної конструкції з тонкими протяжними під областями. // Вісник Слов'янського державного педагогічного університету. - 2005.- Випуск 1. - с. 62 – 68.

