

В.В. ВАРДАНЯН, В.А. ГРИГОРЯН, М.А. КАРАПЕТЯН, Л.О. КАРАХАНЯН

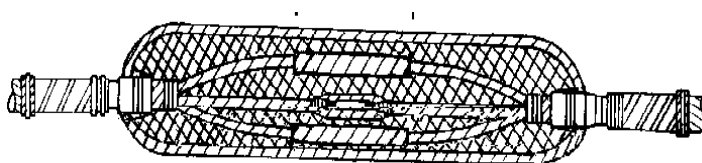
РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В СРЕДНЕЙ ЧАСТИ КАБЕЛЬНОЙ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ МУФТЫ

Обоснована допустимость расчета поля в средней части муфты методом зеркальных изображений при условии замены неоднородной изоляции однородным диэлектриком с эквивалентной ДП. Рассчитана напряженность поля в слое пропитывающего состава между первыми двумя слоями бумаги. Это поле способно вызвать частичные пробои сплюснутых газовых пузырьков.

Ключевые слова: кабель, соединительная муфта, электрическое поле, зеркальное изображение.

Известно, что кабельные соединительные муфты являются слабым местом кабельной линии с точки зрения электрической прочности. Расчет электрического поля в средней части муфты осуществляется методом зеркальных изображений. Однако этот метод применим при условии, когда заряженные оси находятся в однородной среде, что в данном случае не имеет места. Целью настоящей работы является замена неоднородной диэлектрической среды в центральной части муфты эквивалентной однородной.

1. *Расчет относительной диэлектрической проницаемости (ОДП) эквивалентной однородной среды.* Продольное сечение муфты и ее средняя часть (рис.1) выделены двумя вертикальными линиями. Поперечное сечение средней части муфты представлено на рис.2. Здесь 1 - металлическая цилиндрическая гильза, соединяющая концы металлических жил двух отрезков кабеля; 2 - изоляция из пропитанной компаундом МК-45 бумажной ленты шириной 240 мм; 3 - битумная масса МБ-90; 4 - поясная изоляция из пропитанной бумаги; 5 - свинцовая труба, которая практически находится в земле.

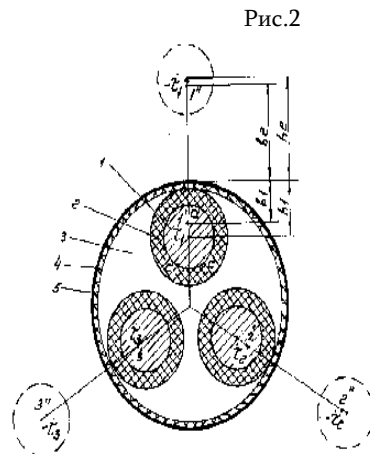


Учитывая сложный характер неоднородности изоляции средней части муфты, расчет может быть осуществлен с некоторыми допущениями. Определяем ОДП изоляции металлических жил двух отрезков кабеля на участке их стыковки с помощью металлической гильзы 1 (рис.2) в форме полого кругового цилиндра. Изоляция 2 осуществляется рулоном кабельной бумаги, пропитанной компаундом МК-45 (объемная доля канифоли 0,45, $\epsilon_r = 3,0$, трансформаторного

масла 0,55 и 2,3 соответственно). ОДП компаунда определяется выражением

$$\epsilon_{\text{комп}} = f_{\text{м}}\epsilon_{\text{м}} + f_{\text{к}}\epsilon_{\text{к}} = 2,615, \quad (1)$$

где $f_{\text{м}}$ и $f_{\text{к}}$ - соответственно объемные доли масла и канифоли.



ОДП одного слоя пропитанной бумаги рассчитаем по выражению [1]

$$\epsilon = \epsilon_{\text{комп}} \left[1 + \frac{\rho_{\text{бум}}}{\rho_{\text{клет}}} \frac{\epsilon_{\text{клет}} - \epsilon_{\text{комп}}}{\epsilon_{\text{комп}} + (\epsilon_{\text{клет}} - \epsilon_{\text{комп}}) \left(1 - \frac{\rho_{\text{бум}}}{\rho_{\text{клет}}} \right) N} \right], \quad (2)$$

где $\rho_{\text{бум}}$ и $\rho_{\text{клет}}$ - удельные веса сухой непропитанной бумаги и клетчатки (соответственно 0,955 и 1,5 $г/см^3$); $\epsilon_{\text{клет}} = 6,5$; N - коэффициент деполяризации поперек волокон клетчатки ($N=0,89$). Результат расчета $\epsilon_{\text{б}} = 4,218$.

Между слоями бумаги обязательно имеется пропитывающий состав, толщина которого равна 0,02 мм.

Итак, имеется двухслойный диэлектрик - пропитанная бумага толщиной 0,1 мм и $\epsilon_{\text{б}} = 4,218$ и слой компаунда толщиной 0,02 мм и $\epsilon_{\text{комп}} = 2,615$.

ОДП бумажной изоляции в центральной части муфты определяется формулой

$$\varepsilon_{\text{из}} = (d_1 + d_2) \frac{\prod_{i=1}^2 \varepsilon_i}{\sum_{j=1}^2 d_j \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^2 \varepsilon_i} = 0,12 \frac{4,218 \cdot 2,615}{0,1 \cdot 2,615 + 0,02 \cdot 4,218} = 3,827 \approx 3,83. \quad (3)$$

Это значение $\varepsilon_{\text{из}}$ верно и для поясной изоляции.

Почти половину площади поперечного сечения центральной части муфты занимает масло-битумная масса МБ-90. Расчет ОДП этой массы по выражению (1) дает $\varepsilon_{\text{МБ}} = 2,93$. Площадь, занятую битумом, приходящуюся на долю одной жилы, представим в виде цилиндрического кольца, охватывающего бумажную изоляцию жилы радиусами 17 и 22,8 мм. Эквивалентную ОДП двухслойного диэлектрика цилиндрической конструкции можно определить по формуле

$$\varepsilon = \frac{\prod_{i=1}^2 \varepsilon_i}{F_{\text{ин}}} \ln \frac{R_1 + \sum_{i=1}^2 d_i}{R_1}, \quad F_{\text{ин}} = \sum_{j=1}^2 \ln \frac{R_{j+1}}{R_j} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^2 \varepsilon_i, \quad R_{j+1} = R_j + d_j, \quad (4)$$

где d - толщина стенок цилиндров.

Расчет по (4) приводит к результату $\varepsilon = 3,42$, что является ОДП эквивалентного однородного диэлектрика, охваченного свинцовой трубой.

2. Расчет электрического поля в отдельных точках изоляции средней части муфты.

Электрическое поле в изоляции средней части муфты рассчитывается методом зеркальных изображений. Данный метод неприменим для кабелей по причине весьма плотной упаковки проводников сегментной формы и малой толщины изоляции. При этом расстояние между условными центрами проводников может оказаться меньше поперечных размеров этих же проводников.

В средней части муфты положение другое. Большой диаметр свинцовой трубы муфты позволяет изолировать проводящие жилы (или гильзу) пропитанной бумагой толщиной, более чем в три раза превышающей толщину жильной изоляции в кабеле. Кроме того, между изолированными жилами оставляется небольшой промежуток, который заполняется битумной массой (рис. 2). Получается, что расстояние между осями гильз более чем в пять раз превосходит радиус гильзы в форме кругового цилиндра.

Таким образом, применение метода зеркальных изображений для решения данной задачи, обеспечивающей достаточную для практики точность расчета, можно считать приемлемым.

На рис.2 показаны (вне сечения муфты) точки расположения геометрических осей зеркальных изображений металлических жил. Эти точки инверсны относительно окружности, изображающей свинцовую трубу муфты. Указаны также точки расположения электрических осей (1' и 1"; 2' и 2"; 3' и 3") реальных и зеркальных изображений проводящих жил. Для этого определены размеры h_1 и h_2 и соответственно

$$b_1 = \sqrt{h_1^2 - R^2} = 14,9 \text{ мм}, \quad b_2 = \sqrt{h_2^2 - R^2} = 33,2 \text{ мм},$$

где R - радиус жилы (гильзы).

Для определения линейных зарядов электрических осей воспользуемся системой уравнений [2,3], которые в данном случае принимают вид

$$\begin{aligned}\alpha_{11} \tau_1 + \alpha_{12} \tau_2 + \alpha_{13} \tau_3 &= U_1, \\ \alpha_{21} \tau_1 + \alpha_{22} \tau_2 + \alpha_{23} \tau_3 &= U_2, \\ \alpha_{31} \tau_1 + \alpha_{32} \tau_2 + \alpha_{33} \tau_3 &= U_3,\end{aligned}\tag{5}$$

правые части которых есть фазные напряжения.

Потенциальные коэффициенты α для трехжильных кабелей (и муфт) определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}\alpha_{11} = \alpha_{22} = \alpha_{33} &= \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{Aa}{R}, \\ \alpha_{12} = \alpha_{23} = \alpha_{31} &= \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{Ab}{AB},\end{aligned}\tag{6}$$

где A и B - точки расположения электрических осей реальных металлических жил фаз A и B ; a и b - то же самое для зеркальных изображений: двумя буквами обозначены расстояния между соответствующими осями.

После расчета система уравнений (5) принимает вид

$$\begin{aligned}8,196 \cdot 10^9 \tau_1 + 4,279 \cdot 10^9 \tau_2 + 4,279 \cdot 10^9 \tau_3 &= 6 \cdot 10^3, \\ 4,279 \cdot 10^9 \tau_1 + 8,196 \cdot 10^9 \tau_2 + 4,279 \cdot 10^9 \tau_3 &= 6 \cdot 10^3 \cdot e^{-j120^\circ}, \\ 4,279 \cdot 10^9 \tau_1 + 4,279 \cdot 10^9 \tau_2 + 8,196 \cdot 10^9 \tau_3 &= 6 \cdot 10^3 \cdot e^{j120^\circ}.\end{aligned}\tag{7}$$

Расчет этой системы дал следующие результаты:

$$\begin{aligned}\pm \tau_1 &= \pm 1,532 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м} \quad \pm \tau_2 = \pm 1,532 \cdot 10^{-6} e^{-j120^\circ} \text{ Кл/м}, \\ \pm \tau_3 &= \pm 1,532 \cdot 10^{-6} e^{j120^\circ} \text{ Кл/м}.\end{aligned}\tag{8}$$

Как видно из рис.2, наибольшие напряженности электрического поля должны быть в точках a и c на поверхностях каждой металлической жилы, примыкающей к изоляции.

Расчет напряженности в данной точке, вызванной линейным зарядом τ электрической оси, определяется выражением

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r},\tag{9}$$

где r - расстояние между точками расположения электрической оси и определения E .

В зависимости от знака τ вектор \vec{E} направлен по (или против) \vec{r}_0 , где \vec{r}_0 -

единичный вектор в направлении r . В точках a и c по (8) определены составляющие напряженностей от каждой электрической оси с зарядами, найдены проекции по осям x и y и рассчитаны результирующие амплитудные значения: $E_{AM} = 14,1 \text{ кВ/см}$, $E_{CM} = 5,94 \text{ кВ/см}$.

Большой интерес представляет определение напряженности поля в слое компаунда между первыми двумя слоями бумаги. На первый слой бумаги с прилегающим слоем компаунда суммарной толщиной $0,12 \text{ мм}$ приходится напряжение $U = 1,41 \cdot 0,12 \cdot 10^3 = 170,4 \text{ В}$. При совместном решении системы двух уравнений

$$\begin{aligned} 0,1 E_B + 0,02 E_{\text{комп}} &= 170,4, \\ \varepsilon_B + E_B &= \varepsilon_{\text{комп}} E_{\text{комп}} \text{ или } 4,218 E_B = 2,615 E_{\text{комп}}. \end{aligned} \quad (10)$$

получаем $E_{\text{комп}} = 20,78 \text{ кВ/см}$. Электрическое поле указанной напряженности может вызвать частичные пробой сплюснутых газовых пузырьков в компаунде и со временем привести к пробую бумажной изоляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Карапетян М.А.** Исследование электрического поля в неоднородной среде. – Ереван: Айастан, 1990. - 216 с.
Нейман Л.Ф., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Том 2.-Л.: Энергоиздат, 1981. - 415 с.
2. Կարապետյան Մ.Ա., Հակոբջանյան Գ.Դ. Էլեկտրատեխնիկայի տեսական հիմունքները. Հատոր II. - Եր.: Լույս, 1989. - 449 էջ:

ГИУА. Материал поступил в редакцию 14.06.1999.

**Վ.Վ. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ, Վ.Ա. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Մ.Ա. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ,
Լ.Հ. ԿԱՐԱԽԱՆՅԱՆ**

ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԴԱՇՏԻ ՀԱՇՎԱՐԿԸ ԿԱԲԵԼԱՅԻՆ ՄԻԱՎՈՐԻՉ ԿՑՈՐԴՅԻ ՄԻՋԻՆ ՄԱՍՈՒՄ

Հիմնավորված է հայելային պատկերների մեթոդով իրականացված էլեկտրական դաշտի հաշվարկը կցորդչի միջին մասում, երբ անհամասեռ մեկուսիչը փոխարինված է համարժեք ԴԹ համասեռ դիէլեկտրիկով: Որոշված է դաշտի լարվածությունը մեկուսչի թղթի առաջին երկու շերտերի միջև գտնվող տոգորող հեղուկ դիէլեկտրիկի շերտում: Դաշտն այդ շերտում կարող է առաջացնել ճզմված գազային պղպջակների մասնակի պարպումներ:

**V.V. VARDANYAN, V.A. GRIGORYAN, M.A. KARAPETYAN,
L.H. KARAKHANYAN**

ELECTRIC FIELD CALCULATION IN THE MEAN PART OF THE CABLE CONNECTOR

Electric field calculation admissibility in the mean part of the connector in case of inhomogeneous isolation substitution for the homogeneous dielectric with equivalent DP is elucidated by the mirror image method. The field intensity in the impregnating compound layer between the first two layers of the paper is calculated. This field is capable of causing partial break-down of flattened gas bubbles.