

# ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ МУФТАХ С ЭЛАСТОМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ НА НАПРЯЖЕНИЕ 110 кВ

*С.С. Ветлугаев, инженер;*

*Л.Е. Макаров, канд. техн. наук, зав. лабораторией;*

*Ю.В. Образцов, канд. техн. наук, зав. отделом;*

*П.В. Фурсов, ст. научн. сотр.;*

*ОАО «ВНИИКП»*

Надежность работы кабельной линии (КЛ) в значительной степени определяется арматурой, в том числе концевыми и соединительными муфтами.

Для соединения двух строительных длин кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена в основном используют два различных типа соединительных муфт. К первому типу относятся муфты, изоляция которых формируется на месте монтажа в пресс-форме. Ко второму типу относятся муфты, изоляция которых состоит из одного или нескольких эластомерных элементов, предварительно отпрессованных и испытанных в заводских условиях [1]. Ко второму типу соединительных муфт относятся следующие конструкции:

1. Сборная муфта – изоляция этой муфты состоит из двух предварительно изготовленных из эластомерного материала конусов, которые устанавливаются в центральном изоляторе, отлитом из терморезистивной смолы (рис. 1). В конусах и в центральном изоляторе находятся электроды для регулирования напряженности электрического поля. Давление конусов на центральный изолятор и на кабель поддерживается при помощи сжимающего устройства, которым обычно является металлическая пружина.

2. Муфта выполнена в виде одной цилиндрической втулки, предварительно изготовленной из эластомерного материала, внутри которой имеются выравнивающие электрическое поле электроды, выполненные из электропроводящего эластомерного материала. Втулка устанавливается с натягом на соединяемые кабели, и давление втулки на поверхность кабеля определяется упругостью материала, из которого она изготовлена (рис. 2).

3. Муфта состоит из двух предварительно изготовленных цилиндрических втулок. Такая муфта похожа на муфту (п. 2). Первая втулка содержит высоковольтный электрод, регулирующий электрическое поле, а также, частично, участки выравнивающего конуса. Первая втулка устанавливается с натя-

гом на изоляцию кабеля. После установки на место соединения кабелей первой втулки на нее надвигается вторая втулка большего диаметра, которая содержит также участки выравнивающего конуса, которые вместе с участками на первой втулке формируют полный выравнивающий конус. На наружную поверхность второй втулки наносится электропроводящий слой (экран по изоляции муфты).

4. Муфта состоит из трех предварительно отформованных цилиндрических втулок (рис. 3). Две втулки вместе с выступающей соединительной гильзой формируют поверхность для установки третьей протяженной втулки. На наружной поверхности этой втулки нанесен экранирующий слой, а на внутренней поверхности имеется слой для экранирования соединительной гильзы. Эта муфта, несмотря на большее в сравнении с конструкциями п. 2 и п.3 количество элементов, обладает некоторыми преимуществами: гильза может выступать за границы изоляции, то есть может быть использована гильза, например, с болтовым соединением для больших сечений жил кабеля, втулки меньших габаритов позволяют упростить процесс их установки. Такая конструкция муфт будет рассмотрена ниже.

Процесс монтажа соединительных муфт по п.п. 1-4 сводится к растяжению устанавливаемых на кабеле элементов муфт, в некоторых случаях с использованием специальных вспомогательных устройств и последующему сдвигу элементов по поверхности изоляции кабеля или других элементов муфты. Для облегчения сдвига применяют фирменные смазки, как правило, на кремнийорганической основе. Смазка остается после монтажа в зоне контакта элементов муфты и фактически является составляющей изоляции муфт. Поэтому к смазке должны предъявляться высокие требования по электрической прочности.

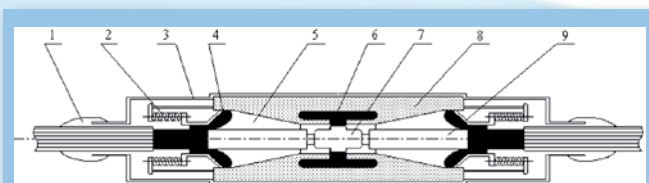


Рис. 1

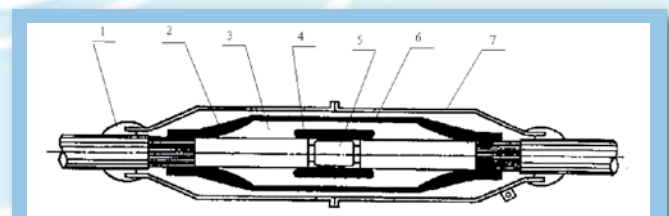


Рис. 2

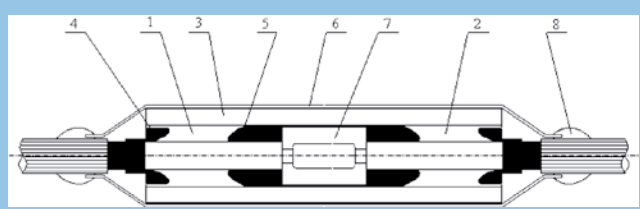


Рис. 3

Главным преимуществом муфт с эластомерной изоляцией является максимальная заводская готовность муфты и, как следствие, небольшое время монтажа. С точки зрения электрической прочности наиболее слабым местом в таких муфтах является граница раздела двух различных материалов (отличающихся по величинам диэлектрических проницаемостей): полиэтиленовой изоляции кабеля и эластомерной изоляции муфты. Следовательно, задача увеличения электрической прочности муфты сводится к задаче увеличения электрической прочности границы раздела двух изоляционных сред. Электрическая прочность границы раздела зависит от нескольких факторов:

- степени обработки взаимодействующих поверхностей, наличие неровностей и выступов приводит к снижению прочности границы;
- давления эластомерной втулки на поверхность изоляции кабеля;
- характеристик используемого смазочного материала;
- распределения электрического поля на границе раздела двух сред;
- температуры и температурных изменений, которые могут приводить к ослаблению давления на границе двух сред в процессе эксплуатации;
- качества проведенных монтажных работ.

В настоящей статье рассматривается наиболее важный из этих факторов – распределение электрического поля на границе раздела двух сред и влияние геометрических параметров изоляции муфты и регулирующих электродов на распределение напряженности электрического поля на этой границе.

В статье представлен анализ электрического поля соединительной муфты на напряжение 110 кВ, конструкция которой изображена на рис. 3, и относится к четвертому типу соединительных муфт. Она состоит из трех предварительно отпрессованных эластомерных втулок (1, 2 и 3), внутри которых находятся выравнивающие электрическое поле электроды (4 и 5), а на внешней поверхности втулки 3 имеется экранирующий слой.

Существует множество компьютерных программ, позволяющих производить электрический расчет изоляции муфт, в основе этих программ лежат различные математические методы (например, метод конечных разностей, метод конечных элементов или метод интегральных уравнений). Ввод данных, определяющих область задачи, в программу расчета по этим методам связан со значительными затратами времени, а в некоторых случаях установление харак-

тера изменения напряженности электрического поля на границе двух сред при изменении геометрии электродов существенно усложняет задачу расчета.

В нашем случае анализ электрического поля муфты проведен с помощью компьютерной программы «AXIAL-2000», которая предназначена для расчета электрических полей в осесимметричных конструкциях.

В настоящей программе для расчета электрического поля используется метод интегральных уравнений. Математическая модель метода интегральных уравнений состоит в том, что среда принимается однородной (в данном случае принято, что проницаемость среды равна  $\epsilon_0$ ), а на границах раздела, то есть на границах проводник-диэлектрик и диэлектрик-диэлектрик, помещаются простые слои зарядов. Поверхностная плотность заряда этих слоев должна быть такой, чтобы потенциал на поверхности проводников принимал постоянное значение, а на границах раздела диэлектриков обеспечивал выполнение известных граничных условий.

Поверхностная плотность заряда определяется путем решения соответствующей системы интегральных уравнений. Для расчетной точки, находящейся на границе проводник-диэлектрик, записывается следующее интегральное уравнение:

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_S \frac{\sigma \cdot dS}{r}, \quad (1)$$

где:  $U$  – потенциал в расчетной точке;  $\sigma \cdot dS$  – элементарный заряд;  $r$  – расстояние от элемента поверхности  $dS$  до расчетной точки.

Для расчетной точки, находящейся на границе диэлектрик-диэлектрик, записывается следующее интегральное уравнение:

$$E_{n1,n2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_S \frac{\sigma \cdot dS}{r^2} \cdot \cos(\psi) \pm \frac{\sigma_{p.m.}}{2\epsilon_0}, \quad (2)$$

где:  $\cos(\psi)$  – косинус угла между суммарным вектором напряженности электрического поля и его нормальной составляющей;  $\sigma_{p.m.}$  – поверхностная плотность заряда в расчетной точке.

Решение задачи может вестись в двух режимах:

1. Расчет основных параметров электростатического поля – напряженностей и потенциалов, расчет начальных напряжений по условию самостоятельности разряда в воздухе или элегазе, построение силовых линий, расчет средних градиентов потенциала по силовой линии в каналах.

2. Расчет частичных емкостей системы.

Геометрическое представление условий задачи требует предварительной подготовки расчетной области с определением координат элементов (экранов, электродов и границ перехода электроизоляционных материалов), образующих эту область. Для этого рекомендуется перерисовать образующие тел, создающих



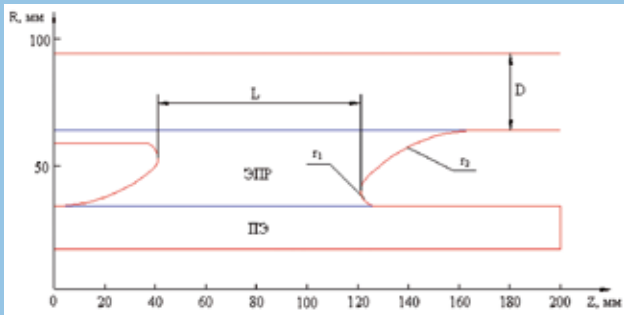


Рис. 4

поле, в координатах « $R$  – вертикально,  $Z$  – вправо». Под телом понимается каждый из электродов и каждая из границ раздела диэлектриков. Соединительная муфта (рис. 3) симметрична относительно оси  $Z$ , поэтому изображается только половина конструкции муфты, и плоскость симметрии имеет координату  $Z = 0$ .

При описании тел учитываются следующие условия, накладываемые программой расчета. Если граница диэлектрика подходит к другому телу, то в точке касания обязательно должна быть расчетная точка и на этом теле. Два проводника не могут иметь общих точек. Не следует задавать две границы по одной и той же линии и границы там, где они совпадают с осью симметрии или плоскостью симметрии или заземленной плоскостью.

На границе раздела двух изоляционных сред с различными диэлектрическими проницаемостями задается отношение этих проницаемостей. На проводниках может задаваться или их потенциал, или полный заряд, если потенциал неизвестен (в нашем случае задавались потенциалы электродов).

Форма тел может задаваться двумя способами. В первом случае («стандартные тела») выбиралось одно из набора тел: прямоугольники (замкнутые или разомкнутые) со скругленными краями, тороид или угловые шайбы (только для электрической изоляции). Далее задавались только расположение и размеры тела и выбирались расчетные точки.

Во втором случае мы можем представить образующую в виде комбинации отрезков прямых, дуг окружностей или эллипсов (использовались нами при описании форм электродов муфты). Для каждого из отрезков определялись его характерные размеры (для линейных – координаты конечных точек и угол с положительным направлением оси  $Z$ , для дуговых – координаты центра, радиус или полуоси и углы начала и конца). Углы на дугах отсчитываются от положительного направления оси  $R$  по часовой стрелке. Программа предусматривает описание образующей от отрезка к отрезку так, чтобы само тело находилось слева от направления обхода. Это направление обхода следует соблюдать в дальнейшем при вводе информации. Следует обращать внимание, не имеет ли образующая не соответствующих реальности изломов. Расчеты показывают, что наличие изломов, может существенно повлиять на результаты расчета.

Выбор расчетных точек следует начинать с областей максимальной кривизны образующей. Здесь расстояние между расчетными точками (расчетный интервал) не должно превышать радиуса кривизны. Если в поле есть поверхности, расположенные на малом расстоянии друг от друга, то длина расчетных интервалов не должна превышать пяти этих интервалов. Кроме того, в этом случае точки на таких телах следует располагать друг против друга. В остальных областях точки нужно выбирать так, чтобы длины соседних интервалов отличались не более чем в 5 раз. Точки на каждом интервале могут задаваться одним из трех способов: равномерно – задаются крайние точки и их общее число, неравномерно – задаются все точки и пропорционально – задаются крайние точки, их общее число и коэффициент пропорциональности.

Если по условиям нашей проблемы необходимо знать параметры поля в точках, находящихся не на границах тел, потребуются координаты таких точек. Учитывая приведенные выше соображения о сложности описания области задачи и выборе расчетных точек, представляется целесообразным решение задачи с определением напряженности электрического поля при максимальных изменениях геометрии области (например, при максимальных возможных изменениях радиуса закругления электрода или его расположения). Затем, используя методы аппроксимации полученных данных можно представить полученную зависимость напряженности электрического поля в виде эмпирической формулы для расчета промежуточных значений напряженности электрического поля и установления характера изменений величины. Если известна эмпирическая формула расчета напряженности электрического поля, можно будет оценить электрическую прочность муфты, а также значительно сократить время, затрачиваемое на электрический расчет изоляции муфты.

С использованием вышеописанной программы проведен расчет напряженности поля на границе раздела двух сред для соединительной муфты, эскиз расчетной области которой показан на рис. 4, результаты вычислений представлены на графике (рис. 5). График тангенциальной напряженности имеет два максимума: один – вблизи электрода 5, который имеет потенциал жилы, второй – вблизи элект-

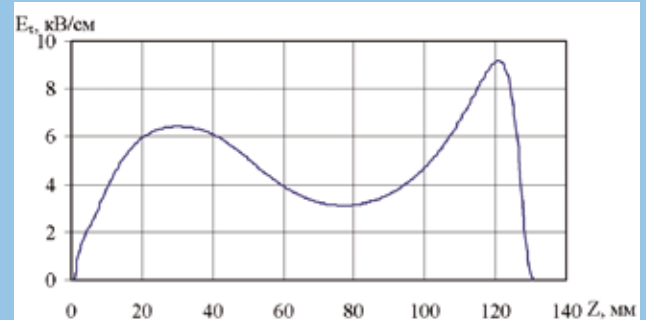


Рис. 5

Рассчитанные по программе «AXIAL-2000» значения  $E_{r\max}$

$S, \text{ мм}^2$	$D, \text{ мм}$	$E_{r\max} \text{ кВ/см}$				
		$L = 60 \text{ мм}$	$L = 80 \text{ мм}$	$L = 90 \text{ мм}$	$L = 100 \text{ мм}$	$L = 120 \text{ мм}$
185	10	13,103	12,8071	12,7449	12,7094	12,6722
	20	11,6595	11,2156	11,1115	11,047	10,978
	30	10,7525	10,1816	10,038	9,94417	9,83782
300	40	10,1443	9,469	9,29098	9,17025	9,02733
	10	12,7064	12,4042	12,341	12,3039	12,2656
	20	11,2825	10,8308	10,7254	10,659	10,5891
500	30	10,3912	9,81291	9,66722	9,57137	9,46357
	40	9,79567	9,11292	8,93295	8,81026	8,66552
	10	12,2527	11,9443	11,8787	11,8385	11,803
630	20	10,8515	10,3911	10,2837	10,2142	10,1432
	30	9,97809	9,39108	9,24323	9,1443	9,03586
	40	9,39712	8,7059	8,52346	8,39772	8,25128
800	10	12,0367	11,7244	11,6596	11,6163	11,5816
	20	10,6464	10,1813	10,0741	10,0019	9,93108
	30	9,78147	9,18972	9,04177	8,94031	8,83081
1000	40	9,2073	8,51157	8,32892	8,20076	8,05489
	10	11,8324	11,5167	11,4507	11,4076	11,3728
	20	10,4522	9,98321	9,87354	9,80227	9,73193
1000	30	9,59552	8,99963	8,84943	8,7484	8,63943
	40	9,02806	8,32813	8,14329	8,01541	7,86882
	10	11,6305	11,3114	11,242	11,2017	11,1648
	20	10,2601	9,78721	9,67455	9,60501	9,53377
	30	9,41154	8,81156	8,65853	8,55871	8,44785
	40	8,85054	8,14674	7,95905	7,83214	7,68451

рода 4 с нулевым потенциалом. Очевидно, что граница изоляции кабеля и эластомерной изоляции муфты по отмеченным выше причинам является наиболее слабой областью изоляции и величина продольной (тангенциальной) – составляющая напряженности электрического поля, определяет электрическую прочность изоляции муфты. Предварительно был проведен анализ влияния радиусов кривизны электродов  $r_1$  и  $r_2$  (приняты одинаковыми для электродов с потенциалом земли и потенциалом жилы) на напряженность электрического поля на границе двух различных материалов. По результатам расчета принято значение радиусов  $r_1 = 6 \text{ мм}$  и  $r_2 = 60 \text{ мм}$ .

Оценим с помощью программы «AXIAL-2000» изменения тангенциальной составляющей максимальной напряженности электрического поля ( $E_{r\max}$ ) при изменении: сечения жилы кабеля ( $S$ ), расстояния между электродами ( $L$ ) и толщины эластомерной трубки ( $D$ ) при принятых  $r_1 = 6 \text{ мм}$  и  $r_2 = 60 \text{ мм}$ .

Результаты вычислений сведены в таблице и могут быть представлены в виде отдельных зависимостей  $E_{r\max}$  от рассматриваемых параметров. Эти зависимости аппроксимировали с использованием линейных, степенных, экспоненциальных или логарифмических функций с определением коэффициента корреляции. Установлено, что логарифмическая функция вида:  $E_{r\max} = A + B \ln(S, D, L)$  с коэффициентом корреляции близким к единице подходит для описания зависимостей  $E_{r\max}$  от величин  $S, D, L$ . При этом для сечений кабеля 185, 300 и 500 мм<sup>2</sup> объединенная эмпирическая формула может быть представлена в виде:

$$E_{r\max} = 13,25 + 1,05 \ln L + 0,79 \ln D - 0,716 \ln L \ln D \quad (3)$$

Погрешность при расчете напряженности электрического поля по формуле (3) не превышает:

$$\delta = \frac{E_{\text{прог}} - E_{\text{форм}}}{E_{\text{прог}}} \cdot 100\% = \frac{10,978 - 10,399}{10,978} \cdot 100\% = 5\% \quad (4)$$

Эмпирическая формула (3) связывает два параметра  $D$  и  $L$ , которые определяют габариты муфты и при известных значениях допустимой тангенциальной составляющей напряженности электрического поля позволяют оценить габариты муфты. Задачу определения допустимых значений напряженности предлагается решить с использованием моделей муфты.

Пример расчета габаритных размеров муфты.

Например для кабеля с сечением токопроводящей жилы 630 мм<sup>2</sup> при допустимой тангенциальной напряженности электрического поля  $E_{\text{дон}} < 9 \text{ кВ/см}$ , толщина изоляционной втулки 3 (рис. 3) должна быть 30 мм, а расстояние между электродами – 100 мм. Габаритные размеры соединительной муфты будут: наружный диаметр муфты – 200 мм, длина – 1140 мм.

ЛИТЕРАТУРА



1. Working Group 21.06, «Accessories for HV extruded cables», CIGRE 89, (1995), 36 p.
2. Миролубов Н.Н. и др. «Методы расчета электростатических полей», «Высшая школа», 1963.
3. Смирнов Н.В. «Курс теории вероятности и математической статистики», «Наука», 1965.