

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ И ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СШИТОЙ ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ МУФТ КАБЕЛЕЙ НА НАПРЯЖЕНИЕ 110 кВ

Л.Е. Макаров, канд. техн. наук, зав. лабораторией;
П.В. Фурсов, научный сотрудник;
 ОАО «ВНИИКП»

Надежность работы кабельных линий электропередачи на напряжение 110 кВ и выше во многом определяется конструкцией и технологией монтажа соединительных муфт (СМ) и концевых муфт (КМ).

При этом особое значение условия монтажа муфт приобретают в случае монтажа высоковольтных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ), электрическая прочность которых в значительной степени зависит от наличия инородных включений и пустот.

В эксплуатации с 1992 года в различных энергосистемах находятся СМ, разработанные в ОАО «ВНИИКП». При монтаже СМ использовалась технология получения их монолитной усиливающей изоляции из полиэтиленовых (ПЭ) лент. Монолитность изоляции обеспечивается их вулканизацией при повышенной температуре с использованием в качестве среды давления газообразного азота.

В настоящей статье оценивается влияние технологических факторов на электрическую прочность и напряженность электрического поля в изоляции СМ. На основании результатов по определению импульсной электрической прочности СМ уточнена допустимая толщина изоляции муфт. На основе опыта эксплуатации и результатов стендовых испытаний оценена надежность разработанных СМ.

В качестве факторов, влияющих на увеличение напряженности электрического поля в изоляции СМ, и связанных с особенностью технологии их монтажа, необходимо рассматривать:

- а) неровности накладываемого на изоляцию СМ электропроводящего экрана;
- б) смещение соединяемых жил в СМ с образованием эксцентриситета.

Влияние технологических факторов на электрическую прочность СМ наиболее объективно и просто оценивается при испытании импульсным напряжением.

В высоковольтной лаборатории ОАО «ВНИИКП» были проведены импульсные испытания серии СМ, смонтированных на кабелях на напряжение 110 кВ с токопроводящими жилами сечением 350 и 500 мм². Испытания проводились по ступенчатой методике повышения напряжения (на отрицательной полярности по три импульса на каждой ступени, ступенями 50 кВ до пробоя).

В табл. 1 приведены экспериментальные значения пробивного напряжения. Полученные значения пробивного напряжения обработаны по распределению Вейбулла:

$$p(U_{np.}) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{U_{np.}}{U_0} \right)^m \right], \text{ где} \quad (1)$$

U_0 – параметр масштаба, численно равный пробивному напряжению при вероятности пробоя 0,632;
 m – параметр формы, характеризующей меру разброса результатов испытаний.

Линеаризация уравнения Вейбулла осуществляется линейной функцией вида:

$$y = mx + b, \text{ где} \quad (2)$$

$$x = \ln U_{np.}; \quad b = -m \ln U_0; \quad y = \ln \ln \frac{1}{1 - p(U_{np.})}$$

Коэффициент корреляции r опытных данных теоретическому распределению Вейбулла (1) рассчитан по методу наименьших квадратов. Параметры распределения Вейбулла для значений табл. 1, рас-

Таблица 1

№№ испытываемых образцов	Импульсное пробивное напряжение СМ, кВ, для кабелей сечением, мм ²		Место пробоя
	350	500	
1	700	800	В начале выравнивающего конуса на всех образцах муфт
2	700	850	
3	750	900	
4	750	900	
5	800	950	
6	800	1000	
7	800	—	
8	850	—	
9	950	—	
10	950	—	
11	1050	—	

Таблица 2

Параметры распределения Вейбулла	Для соединяемых кабелей сечением жилы, мм ²	
	350	500
Коэффициент корреляции, r	0,93	0,99
Параметр масштаба U_0 , кВ	880,00	935,09
Параметр формы, m	7,15	11,49

считанные с использованием зависимости (2), приведены в табл. 2.

Все пробои испытанных СМ локализованы в начале конуса, что закономерно для правильно сконструированной СМ. Начало выравнивающего конуса СМ неизбежно является местом ослабления заводской изоляции кабеля вследствие операции по снятию экрана по изоляции и механической обработки изоляции в этом месте. Электрическая прочность, соответствующая величинам пробивных напряжений, приведенных в табл. 1, составляет для СМ на кабелях с сечением жилы 350 мм² – $E_{np.1} = 77$ кВ/мм, а для муфт на кабелях с сечением жилы 500 мм² – $E_{np.2} = 72$ кВ/мм. Полученные результаты свидетельствуют о примерном равенстве электрической прочности СМ при различных толщинах их изоляции (расхождение менее 7%).

Все испытания СМ, результаты которых приведены в табл. 1, были проведены при температуре окружающей среды 18–20°С.

При наложении экрана по изоляции СМ в зоне перехода на участок намотанной изоляции 4 (рис.) появляется ступенчатый выступ. Высота выступа определяется толщиной края ленты дополнительной изоляции СМ. После термообработки изоляции муфты выступ имеет радиус закругления r_3 . По проведенным на срезах изоляции измерениям r_3 изменяется от 1,0 до 1,5 мм.

Коэффициент увеличения напряженности поля K у края выступа вычислялся по известной формуле для определения увеличения напряженности поля на краю конденсаторной обкладки с малым радиусом закругления r_3 ($r_3 \ll d$, где d – толщина изоляции).

$$K = \sqrt{\frac{d + r_3}{2\pi r_3}}$$

Для СМ с сечением жилы 350 мм² значения K находятся в пределах от 1,1 ($r_3 = 1,5$) до 1,32 ($r_3 = 1,0$).

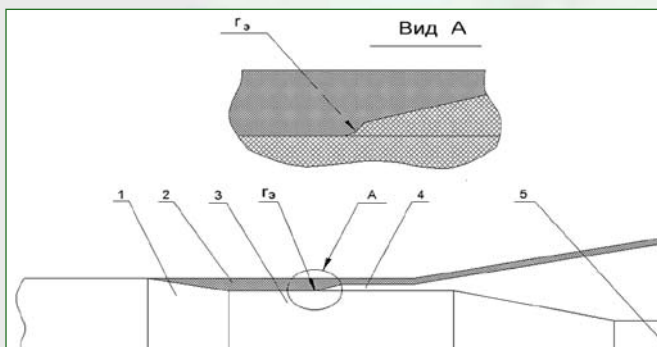


Рис. Схема наложения экрана по изоляции СМ:
1 – конусная часть экрана по изоляции кабеля; 2 – участок восстановленного экрана поверх изоляции кабеля и поверх дополнительной изоляции муфты; 3 – изоляция кабеля; 4 – дополнительная изоляция муфты; 5 – жила кабеля.

Влияние технологических факторов, связанных с неровностью наложенного на изоляцию электропроводящего экрана СМ и возможностью смещения соединяемых жил в СМ, можно также оценить из соотношения электрической прочности изоляции кабелей и изоляции СМ, монтируемых на этих кабелях. В высоковольтной лаборатории ОАО «ВНИИКП» в 1982 и 1987 годах проводились определения импульсной электрической прочности кабелей типа АПВП 64/110 кВ с жилой сечением 350 мм². Результаты испытаний кабелей приведены в табл. 3.

Коэффициент влияния технологической обработки изоляции K для СМ можно определить как отношение электрической прочности кабеля к электрической прочности СМ.

Расчеты для выборок значений импульсной прочности, приведенных в табл. 3 (для кабелей) и табл. 2 (для СМ), дают величину $K = 1,32 \div 1,39$, что хорошо согласуется с полученным выше расчетным значением коэффициента увеличения напряженности электрического поля для СМ с сечением жилы 350 мм² ($K = 1,32$) и подтверждает правильность выбранной модели и проведенных расчетов.

Выбор толщины усиливающей изоляции СМ можно произвести по максимальному расчетному напряжению СМ и допустимой напряженности в изоляции СМ при определенной вероятности пробоя. В случае воздействия грозового импульса при определении максимального расчетного напряжения следует учесть в виде коэффициентов запаса влияние технологической обработки и влияние температуры. При этом максимальное расчетное напряжение U_p можно определить как: $U_p = K_1 K_2 K_3 U_{имп.}$, где K_1 – коэффициент, учитывающий возможное повышение напряжения (обычно $K_1 = 1,15$); K_2 – коэффициент зависимости импульсной прочности полиэтиленовой изоляции кабелей от температуры (принимается по литературным данным, что $K_2 = 1,25$); $U_{имп.}$ – гарантированный уровень импульсной прочности по стандарту МЭК 840 – 550 кВ для кабелей на напряжение 110 кВ и 1080 кВ для кабелей на напряжение 220 кВ; $K_3 = 1,1$ – 10%-ный запас, определяемый как коэффициент неопределенности, в том числе связанный с увеличением напряженности электрического поля в центральной части СМ при возможном смещении соединения жил.

В качестве допустимой напряженности электрического поля можно принять значение $E_{дон.}$ при определенной вероятности пробоя $P(E_{дон.})$, например, если задаться вероятностью отсутствия пробоя при импульсных испытаниях – $Q(E_{исп.}) = 0,99$.

Это соответствует тому, что из 100 испытываемых образцов СМ возможен пробой только одного образца. Учитывая, что $P(E_{дон.}) = 1 - Q(E_{исп.})$,

Таблица 3

Год выпуска кабеля	Параметр масштаба, кВ	Параметр формы, <i>m</i>	Количество испытанных образцов
1982	1223	13.1	22
1987	1218	19.6	20
1987	1165	13.4	22

связь допустимых напряженностей с вероятностью отсутствия пробоя можно выразить как:

$$Q(E_{исп.}) = \exp \left[- \left(\frac{E_{исп.}}{E_0} \right)^m \right]$$

или

$$E_{доп} = E_0 \exp \left[\frac{1}{m} \ln \ln \frac{1}{Q(E_{исп.})} \right] \quad (3)$$

Расчет по (3) для $m = 9,3$ и $E_0 = 75$ кВ/мм (средние значения из табл. 2) при вероятности отсутствия пробоя 0,99 дает значение $E_{доп.} = 47,7$ кВ/мм.

Тогда минимально допустимая толщина монолитной изоляции ($T_{мин.}$) СМ рассчитывается по условию воздействия грозового импульса как:

$$T_{мин.} = K_1 K_2 K_3 U_{имп.}/E_{доп.} \quad (4)$$

$T_{мин.}$ для муфты на напряжение 110 кВ составит 18,2 мм, для СМ на напряжение 220 кВ $T_{мин.} = 35,8$ мм.

Надежность работы СМ, смонтированных на кабелях 110 кВ, подтверждена длительным опытом эксплуатации. Кроме того, проведены длительные стендовые испытания СМ при повышенных значениях напряжения и температуры жилы. Длительность стендовых испытаний составила в общей сложности более двух лет.

Результаты стендовых испытаний для двух СМ приведены в табл. 4. При этом кабельная линия в начале содержала одну СМ типа МСАПв–Г–64/110, которая к настоящему времени находится под напряжением уже 18 934 ч. и 7 588 ч. при воздействии тока перегрузки до 40%. Вторая муфта МСАПв–Г–64/110 находится под напряжением 15 784 ч. и под током перегрузки 4 328 ч. Испытания обеих СМ продолжаются.

Общий срок службы (L) по условиям испытаний образцов можно оценить по степенной зависимости с учетом температурного ускоряющего фактора:

$$L = \sum_{K=1}^{K=n} \exp[T_k - T_0] \left(\frac{U_k}{U_0} \right)^n t_K, \text{ где} \quad (5)$$

K – номер ступени испытания,
 U_k – испытательное напряжение на ступени K ,
 t_K – длительность ступени K ,
 T_0 – рабочая температура жилы кабеля,
 T_k – температура жилы кабеля на ступени K ,
 $n = 15$.

Расчеты по формуле 5 показывают, что при испытании муфт 1 и 2 только за счет одного ускоряющего фактора – воздействующего испытательного напряжения – намного превзойден регламентированный технической документацией срок службы 30 лет.

Надежность работы СМ также можно оценить по опыту эксплуатации в системе «Мосэнерго». Количество повреждений СМ, смонтированных по старой технологии, составило более 40 случаев при общем количестве СМ 578, в то время как у СМ, смонтированных по разработанной технологии, количество повреждений к настоящему времени составляет всего четыре случая при общем количестве муфт более 360. Для сравнения, в СМ с эластомерной изоляцией произошло пять пробоев при общем количестве СМ 394. С учетом того, что время нахождения в эксплуатации СМ с монолитной полиэтиленовой изоляцией, смонтированных по газовой технологии, намного выше, чем время эксплуатации СМ с эластомерной изоляцией, можно говорить о высокой надежности разработанных СМ.

ЛИТЕРАТУРА



1. Yagisawa K. Development of extrusion type molded joint for 275 kV and 500 kV XLPE cables // Hitachi cable Review. 1990. N 9. P. 14
2. МЭК 840. Испытание силовых кабелей с экструдированной изоляцией на рабочее напряжение выше 30 кВ ($U_m = 26$ кВ) до 150 кВ ($U_m = 170$ кВ)
3. Demaria G. Et al. The design of power cables to operate at high electrical stress. Jicable. 1999. P. 37–42.
4. Фурсов П.В. и др. Исследование технологических факторов и электрической прочности соединительных муфт силовых кабелей со шпильной полиэтиленовой изоляцией // Кабельная техника. 1997. № 12–13. С. 78–81.

Таблица 4

Результаты стендовых испытаний СМ типа МСАПв–Г–64/110

Испытательное напряжение, кВ	Ток нагрузки, А	Общее количество времени под напряжением, ч.	Общее количество времени под нагревом, ч.
<i>Первая муфта</i>			
64	722	161	165
75	716	168	260
85	704	168	171
95	955	2 653	2 664
64	846	1 001	938
75	812	3 040	806
75	926	11 743	2 584
<i>Вторая муфта</i>			
64	846	1 001	938
75	812	3 040	806
75	926	11 743	2 584