

**КИМ ЕН ДАР**, д-р тех.наук, проф. УИПА, Славянск;  
**Д.Г. КАРЮК**, директор по производству, «Славэнергопром»,  
 Славянск;

### ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ ВНУТРЕННЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРОХОДНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

Основной причиной выхода со строя проходных изоляторов с полимерной изоляцией класса 35 кВ является электрическое старение, обусловленное высоким электрическим полем. На основе результатов аналитического исследования и численных решений уравнения Лапласа для комплексной проводимости обоснованы рекомендации по выравниванию электрического поля изолятора. Сформулированы оптимальные соотношения основных параметров конструкции изолятора с учетом характеристик применяемых диэлектрических материалов. Приведена количественная оценка краевого эффекта заземленного фланца, даны практически реализуемые пути снижения такого эффекта: увеличение радиуса закругления краев фланца и нанесение слабопроводящего покрытия на ограниченном участке внешней поверхности опорной трубы.

**Ключевые слова:** проходной высоковольтный изолятор, полимерная изоляция, напряженность электрического поля, краевой эффект

**Введение.** Опыт создания и эксплуатации проходных высоковольтных изоляторов с полимерной изоляцией показал в целом преимущества, присущие изоляционным конструкциям с защитным покрытием из кремнийорганических эластомеров. Это, прежде всего, высокая устойчивость к загрязнению, простота их обслуживания, а также относительно низкая себестоимость, поскольку отсутствует дорогостоящий и при этом хрупкий фарфоровый элемент. Вместе с тем на некоторых электропредприятиях были отмечены ранние отказы изоляторов класса 35 кВ по причине электрического пробоя.



Рис. 1 – Следы электрических разрядов

© Ким Ен Дар. Г. Карюк. 2014

Обследование поврежденных изоляторов, а также лабораторными исследованиями было установлено, что имеет место электрическое старение изоляции на самом напряженном промежутке изоляции: токопровод – фланец, что обусловлено протеканием частичных разрядов (рис. 1).

В этих условиях, как известно [1], срок службы изоляции оценивается степенной функцией от максимальной напряженности электрического поля в диэлектрике:

$$\tau = AE^{-n}$$

где  $n = 5 \div 7$  при переменном токе промышленной частоты.

Поэтому, при прочих равных технологических факторах, которые так или иначе могут повлиять на электрическую прочность, очень важно, чтобы конструкция изолятора обеспечивала оптимальное распределение поля в наиболее уязвимом участке изоляции.

**Основной материал.** На рис.2 приведен общий вид полимерного проходного изолятора с цилиндрическим токопроводом. Изоляционное тело, охватывающее концентрически токопровод, выполняется из двух составляющих: из механически прочной опорной цилиндрической втулки, представляющей собой стеклопластиковую трубу, и из эластичной изоляции, из кремнийорганической резины. С целью исключения воздушных полостей резиной целиком заполняется пространство между токопроводом и опорной втулкой. Ею покрывают внешнюю поверхность втулки, и таким образом создается монолитная изоляция между потенциальным токопроводом и заземляемым фланцем.

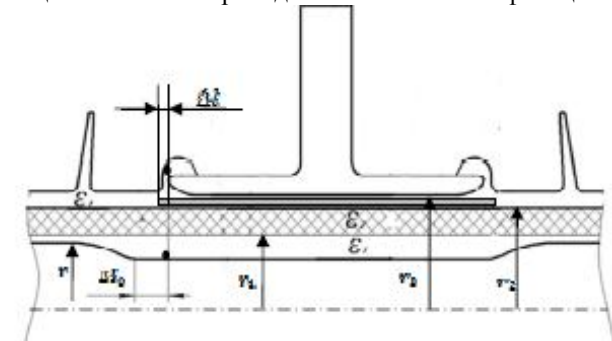


Рис. 2 – Общий вид проходного изолятора

Ранее было показано [1, 2], что для оценки максимальной напряженности поля в серединной области изолятора, на поверхности токо-

провода напротив фланца, достаточно воспользоваться уравнением поля цилиндрического конденсатора:

$$E_{m,\tau} < E_{m,\varphi} = \frac{U}{r_0} \cdot \frac{1}{\left( \ln \frac{r_1}{r_2} + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_1}{r_2} + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3} \ln \frac{r_3}{r_2} \right)} \quad (1)$$

С учетом  $\varepsilon_1 = 3$

$$E_{m,\tau} \approx \frac{U}{r_0} \cdot \frac{1}{r_0 \left[ \ln \frac{r_3}{r_0} + \left( \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \ln \frac{r_2}{r_1} \right]} \quad (2)$$

Из приведенных формул вытекает, что на распределение электрического поля в многослойном изоляционном промежутке токопровод – фланец, существенное влияние оказывают диэлектрические характеристики составных элементов изоляции  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  и соотношение их толщин  $r_1, r_2$ . Кроме того максимальные значения напряженностей электрического поля, что имеет место на поверхностях токопровода и фланца, также зависят от взаимного расположения и их конфигурации.

Диэлектрическая проницаемость используемых на сегодня резин  $\varepsilon_1$  заметно меньше, чем  $\varepsilon_2$  стеклопластиковой изоляции, поэтому вторая слагаемая в знаменателе (2) всегда имеет отрицательное значение. Следовательно, чем меньше это значение, тем меньше окажется максимальная напряженность поля у поверхности токопровода, т.е., можно записать следующее условие минимума  $E_{m,\tau}$ :

$$E_{m,\tau} \rightarrow \min, \text{если} \left| \left( \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \ln \frac{r_2}{r_1} \right| \rightarrow 0 \quad (3)$$

Из соотношения (3) можно видеть, что для снижения поля у токопровода необходимо применять изоляционные материалы с близкими диэлектрическими проницаемостями или же по возможности уменьшить толщину опорной трубы:

$$\left( 1 - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right) \ln \frac{r_2}{r_1} \sim \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_2} \cdot \frac{\Delta r}{r_1} \rightarrow 0 \quad (4)$$

где:  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$ ;  $\Delta r = r_2 - r_1$

Для инженерной практики удобнее пользоваться условием, учитывая общим изоляционное расстояние между электродами  $\Delta R$ :

$$\frac{\Delta r}{\Delta R} < \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (5)$$

Правомерность соотношения (5) была подтверждена численными методами электростатического поля с комплексной проводимостью исследуемой области для реальных проходных изоляторов на классы напряжения 10-35 кВ. На рис. 3 приведен пример распределения радиальной напряженности поля в изоляции в поперечном направлении (см. рис. 3), начиная от токопровода  $m.a$  и заканчивая торца фланца изолятора с полусферическим профилем  $m.b$ . При расчетах были приняты следующие параметры высоковольтного проходного изолятора с номинальным напряжением 35 кВ:

Таблица 1 – Параметры высоковольтного проходного изолятора

Напряжение	Материал			Примечание
	Резина	Стеклопластик	Воздух	
$U=25$ кВ	$\varepsilon_1=2,5$ ; $\sigma_1=1 \cdot 10^{-13}$	$\varepsilon_2=4 \div 8$ ; $\sigma_2=1 \cdot 10^{-12}$	$\varepsilon_3=1$ ; $\sigma_3=1 \cdot 10^{-16}$	$\sigma$ - удельная проводимость, См/м

График распределения поля наглядно иллюстрирует явление вытеснения поля из объема опорной трубки в сторону резиновых оболочек (см. область  $\varepsilon_2$ ). Из рис. 3 (кривая 1) также видно, что максимальная напряженность поля у торца фланца  $E_{m,\varphi}$  намного превосходит поле у токопровода, что обусловлено краевым эффектом.

Как известно, краевой эффект удается существенно смягчить увеличивая радиус кривизны, в данном случае, торцевой части электрода. Количественная оценка сравниваемых полей представлена на рис. 4 в виде распределений напряженностей вдоль наиболее электрически нагруженных поверхностей краев электрода [2].

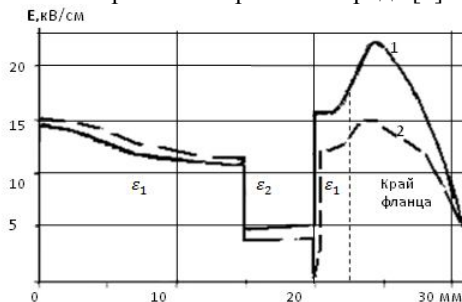


Рис. 3 – Распределение напряженности поля в промежутке  $m, a - m, b$

Значения напряженности поля на этом рисунке приведены в относительных единицах, относительно наибольшей напряженности на по-

верхности края фланца с измененным профилем (зависимость 2), что сделано для того чтобы наглядно представить уровень возможного выравнивания поля. Как можно заключить по рис. 4, посредством оптимизации формы краев фланца по образцу электрода Роговского [3] удастся уменьшить напряженности поля ниже наибольшей напряженности поля на поверхности токопровода:

$$E_{m,\phi} \leq E_{m,\tau} \quad (6)$$

Для последующего снижения напряженности поля можно пойти по пути простого увеличения изоляционного промежутка между электродами.

Очевидно, чем больше общий промежуток  $\Delta R$  между токопроводом и фланцем, тем ниже в среднем напряженность поля в этом промежутке, что согласуется приведенным критерием оптимальности радиальных параметров изолятора (5).

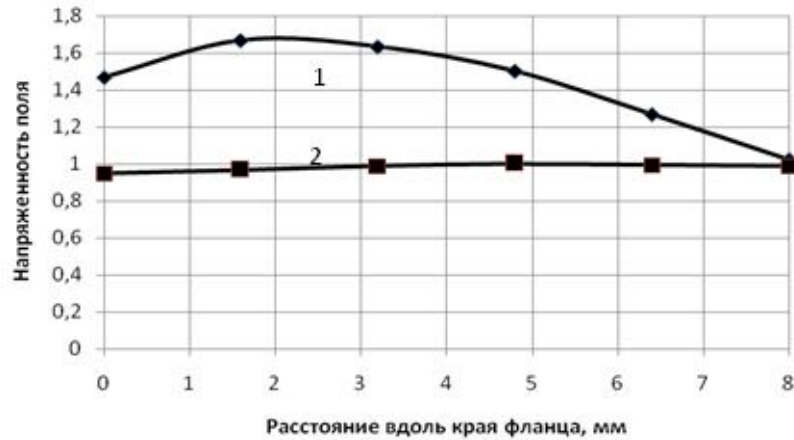


Рис. 4- Распределение напряженности поля вдоль поверхности краев фланца: 1- до оптимизации; 2- после оптимизации фланца

Для того чтобы по возможности сохранить жесткость конструкции целесообразнее увеличить общий диаметр токопровода, оставляя при этом исходный диаметр только на участке наибольшей напряженности электрического поля, соответствующей проточкой токопровода, как это показано на рис. 2. При этом минимальная длина проточки должна быть скоординирована с ее глубиной или же общим изоляционным расстоянием  $\Delta R$  следующим образом (рис.5):

$$(0,7 \div 0,8) < \frac{\Delta l}{\Delta R} \quad (7)$$

где  $\Delta l$  - параметр, характеризующий длину проточки (см. рис. 1).

В качестве другого способа выравнивания напряженности поля в области торца фланца может быть предложено применение экранирующих обкладок, как таковое предусмотрено в высоковольтных вводах с бумажно – масляной изоляцией конденсаторного типа [2]. Технология изготовления проходных полимерных изоляторов не позволяет изолирующее тело вести более двух обкладок в виде тонких проводящих покрытий на внутренней и внешней поверхностях опорного элемента.

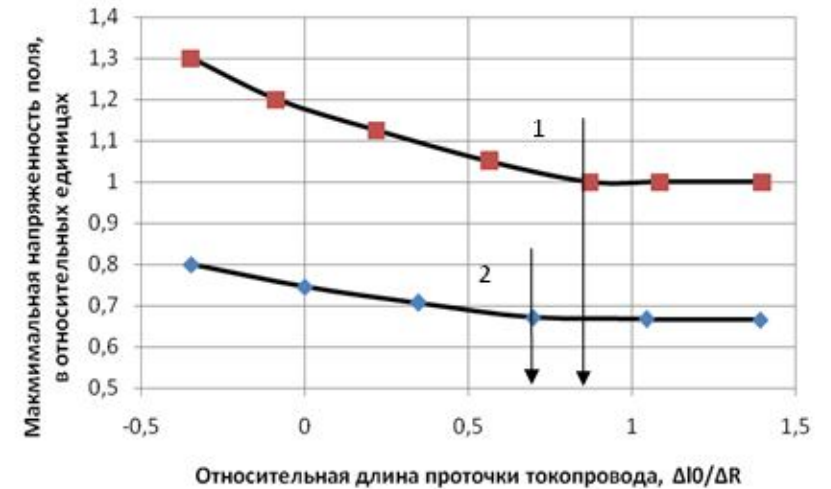


Рис. 5 - Влияние длины заточки токопровода на максимальную напряженность поля на поверхности фланца: 1- до оптимизации; 2- после оптимизации фланца

Расчеты показывают, что для снижения напряженности поля у торца фланца до уровня напряженности на поверхности токопровода (6) можно ограничиться только одной экранирующей обкладкой на внешней стороне стеклопластикового диэлектрика. Как отмечалось выше (см. рис. 3), стеклопластик нагружен электрически значительно слабее, чем резиновая изоляция и этим обстоятельством объясняется неэффективность второй выравнивающей обкладки. Более того технически непросто установить создать на внутренней поверхности опорной втулки экранирующий элемент.

Качественно эффект выравнивания поля проводящим элементом можно оценить соотношением разностей потенциалов промежутков токопровод – обкладка,  $\Delta\varphi_{0,2}$  и обкладка – фланец,  $\Delta\varphi_{2,3}$ , иными словами, соотношением емкостей этих промежутков  $C_{0,2}$  и  $C_{2,3}$ :

$$\frac{\Delta\varphi_{2,3}}{\Delta\varphi_{0,2}} = \frac{C_{0,2}}{C_{2,3}} \rightarrow \min \quad (8)$$

При заданных диэлектрических характеристиках емкость цилиндрического конденсатора зависит от толщины изоляционной прослойки и от длины электродов: чем тоньше изоляция и чем длиннее электроды, тем больше емкость. Очевидно, величина емкости промежутка токопровод – обкладка  $C_{0,2}$  пропорционально возрастает с увеличением длины проводящей обкладки, в тоже время емкость  $C_{2,3}$  промежутка обкладка – фланец практически ограничивается осевой длиной фланца. Действительно, расчеты показали, что наибольший эффект выравнивания поля достигается в том случае, если длина экрана примерно равна длине фланца.

На рис. 6 представлены зависимости максимальной напряженности поля на поверхности торца фланца (кривая 1) и напряженности у края проводящей обкладки (кривая 2) от параметра, определяющего протяженность этой обкладки относительно фланца.

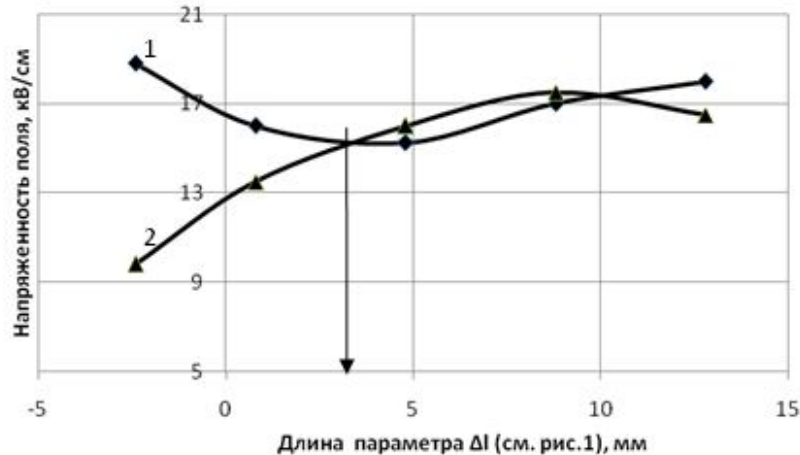


Рис. 6 - Зависимости максимальных напряженностей поля: 1-на поверхности фланца; 2- на краю экрана от взаимного их расположения

Необходимо предостеречь, что введение проводящего элемента может привести к образованию очагов повышенной электрической напряженности в теле изоляции, поэтому во избежание такого явления целесообразно наносить демпфирующие кольцевые покрытия на краях экрана из слабо проводящей резины ( $\sigma \approx 1 \cdot 10^{-7} \text{ СМ/М}$ ).

В настоящее время в производстве больше габаритных изоляционных конструкции применяются двухкомпонентные эластомеры, LSR - жидкие силиконовые резины. Низкая вязкость сырья из жидких резин позволяет при относительно невысоком избыточном давлении добиться полной герметизации узких зазоров между токопроводом, опорным элементом и фланцем, минимизировать образование воздушных щелей в изоляции, на поверхностях составных элементов изолятора. Кроме того, как показывает опыт, с применением жидкой резины просто решается задача однооперационной заливки резиновых оболочек, что минимизирует попадание загрязнений в технологических стыках при многоразовой заливке.

**Выводы:** Рекомендации по оптимизации внутреннего электрического поля:

- предпочтительно выбирать материалы изоляции: резины и опорной трубы с близкими диэлектрическими характеристиками, а соотношения толщин составляющих изоляцию элементов определять в обратной зависимости от их диэлектрических проницаемостей  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ ;
- края фланца выполнить с увеличенным радиусом кривизны, придавая им форму электрода Роговского;
- по возможности увеличить изоляционный промежуток между токопроводом и фланцем, используя токопровод с меньшим диаметром на участке, охватываемом фланцем;
- предусмотреть экранирующую обкладку нанесением проводящего покрытия на наружной поверхности опорного изоляционного элемента на противоположном от фланца участке с осевой длиной, близкой длине фланца; по краям обкладки нанести слабо проводящее покрытие;
- минимизировать технологические факторы, которые могут внести инородные включения в изоляции, в том числе, воздушные прослойки, особенно, в промежутке фланец – токопровод. В этой связи предпочтительнее использовать в качестве герметизирующего элемента и защитной оболочки диэлектрические материалы с низкой вязкостью в исходном состоянии.

**Список литературы:** 1. Техника высоких напряжений. Под ред. М.В. Костенко. – М.: «Высшая школа»,- 1973. – 528 с. 2. Ким Е.Д., Назаренко А.В., Карюк Д.Г. Исследование электрического поля высоковольтного проходного изолятора с полимерной изоляцией // Вестник ХГПУ «ХПИ».- 2013.- Выпуск 17.- с. 93-99. 3. Патент RU(11)2423765(13)C1(51). Способ подбора профиля поверхности электродов для высоковольтных разрядников. Юрьев А.Л.,(RU), Николаев Д.П.,(RU), Эльяш С.Л. – 2006. [www.freepatent.ru/patents/2423765](http://www.freepatent.ru/patents/2423765)

**Bibliography ((transliterated):** 1. *Kostenko M. V.* Tehnika vysokih naprjazhenij. Moscow. Vysshaja shkola. 1973. 2. Kim E. D. Nazarenko. A. V. Karjuk D. G. *Issledovanie elektricheskogo polja vysokovol'tnogo prohodnogo izoljatora s polimernoj izoljaciej* Vestnik HGPU HPI. No 17. 2013. 93-99. 3. Patent RU(11)2423765(13)C1(51). Sposob podbora profilja poverhnosti jelektrodov dlja razrjadnikov. 2006.