

УДК 621.331.3

Е. Д. КИМ (УИПА)

Украинская инженерно-педагогическая академия, отделение электротехнологического факультета, 84100, г. Славянск, Донецкая обл., ул. Добровольского, 1, тел.: (06262) 3-33-34

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПОЛИМЕРНОГО ПРОХОДНОГО ИЗОЛЯТОРА

Введение

Целесообразность создания проходных высоковольтных изоляторов с полимерной изоляцией обусловлена, прежде всего, простотой их монтажа и обслуживания, а также сравнительно низкой себестоимостью, поскольку отсутствует дорогостоящий и при этом хрупкий фарфоровый элемент. Как известно, смолы полиэфирные и эпоксидные, используемые при изготовлении стеклопластиковых труб и стержней, имеют такую же прочность на разрыв, что и фарфор. В тоже время удельная энергия на развитие трещины, на два порядка больше, чем у фарфора [1]. Вследствие этого можно прогнозировать, что при замене в проходном изоляторе хрупкой фарфоровой рубашки аналогичным элементом из пластичных материалов, из стеклопластиковой трубы с внешней резиновой оболочкой, механическое разрушение, обусловленное различными внешними факторами, в том числе динамическим нагревом токопровода, практически можно исключить. Вместе с тем опыт разработки и эксплуатации полимерных проходных изоляторов показывает необходимость поиска конструктивных и технологических возможностей повышения внутренней электрической прочности.

Рассмотрим полимерные проходные изоляторы 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. Резиной целиком заполняется пространство между токопроводом и опорной втулкой. Ею покрывают внешнюю поверхность втулки, и заполняется монолитно с защитным покрытием промежутки втулка – фланец. Принимаемая мера по герметизации для полимерных изоляторов обусловлена необходимостью защиты стеклопластиковой втулки от конденсации атмосферной влаги на ее поверхности и минимизации очагов электрического повреждения изоляции. Таким образом, проходной изолятор можно предста-

вить, как изоляцию цилиндрического конденсаторного типа (рис. 1).

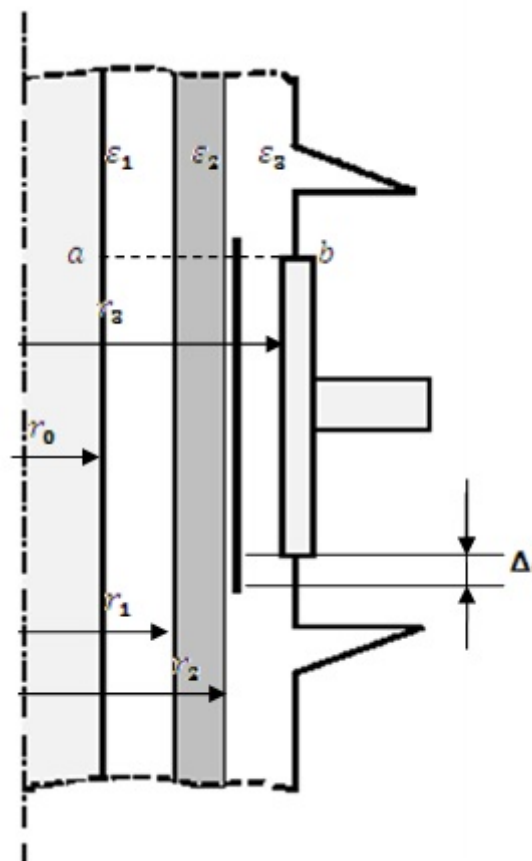


Рис. 1. Макет полимерного проходного изолятора

Известно, что на распределение электрического поля в многослойном изоляционном промежутке, в данном случае, токопровод – заземляемый фланец, существенное влияние оказывают диэлектрические характеристики составных элементов изоляции и соотношение их толщин. Кроме того, максимальные значения напряженности электрического поля, что имеет место у поверхности электродов: у токопровода и фланца, также зависят от взаимного расположения и их конфигурации.

Ранее было показано, что для оценки максимальной напряженности поля в серединной области изолятора, на поверхности токопровода напротив фланца, достаточно воспользоваться уравнением поля цилиндрического конденсатора [2]:

$$\text{С учетом } \varepsilon_1 = \varepsilon_3$$

© Ким Е. Д., 2013

По данным измерений диэлектрическая проницаемость резин ϵ_1 заметно меньше чем ϵ_2 стеклопластиковой изоляции, поэтому вторая слагаемая в знаменателе (2) всегда имеет отрицательное значение. По этой причине, чем меньше это значение, тем меньше окажется максимальная напряженность поля у поверхности токопровода, т.е., можно записать следующее условие минимума

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

$$\frac{\left(1 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}\right) \cdot \ln r_2}{r_1} \sim \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon_2} \cdot \frac{\Delta r}{r_1} \rightarrow 0 \quad (1)$$

где $\Delta\epsilon = \epsilon_2 - \epsilon_1$; $\Delta r = r_2 - r_1$

Для инженерной практики удобнее пользоваться условием, учитывающим общее изоляционное расстояние между электродами ΔR

$$\frac{\Delta r}{\Delta R} < \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \quad (2)$$

при соблюдении которого можно ожидать, что напряженность поля в резине на поверхности токопровода незначительно будет отличаться от возможной минимальной величины. Оно было получено на основе плоскопараллельной модели электрического поля изолятора [2]. Правомерность критерия (5) оптимального выбора соотношений между диэлектрическими характеристиками и геометрическими параметрами была подтверждена проведением численных расчетов с помощью математических моделей электростатического поля с комплексной проводимостью исследуемой области для реальных проходных изоляторов на классы напряжения 10-35 кВ.

На рис. 2 приведен пример распределения радиальной напряженности поля в изоляции в поперечном направлении (см. рис. 1), начиная от токопровода т. а и заканчивая торца фланца изолятора с полусферическим профилем т. b. При расчете были приняты следующие параметры высоковольтного проходного изолятора с номинальным напряжением 35 кВ.

Таблица 1

Напряжение	Материал			Примечание
	Резина	Стеклопластик	Воздух	
U = 25 кВ	$\epsilon_1 = 2,5$; $\sigma_1 = 1 \times 10^{-13}$	$\epsilon_2 = 3...8$; $\sigma_2 = 1 \times 10^{-12}$	$\epsilon_B = 1$; $\sigma_B = 1 \times 10^{-16}$	σ – удельная проводимость, См/м

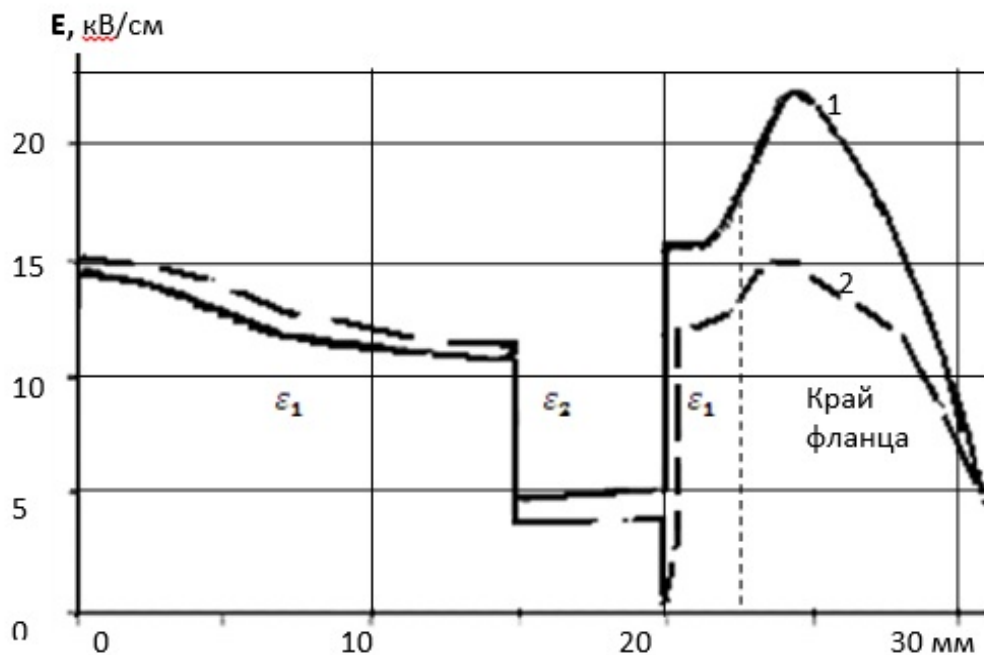


Рис. 2. Распределение напряженности поля в промежутке т. а – т. b (см. рис. 1)

График распределения поля наглядно иллюстрирует последствие значительной разницы величин диэлектрической проницаемости резины и стеклопластика, отмечаемое вытеснением поля из объема опорной трубки в сторону резиновых оболочек. Из рис. 2 (кривая 1) также видно, что максимальная напряженность поля у торца фланца 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. 3 в виде распределений

напряженностей вдоль наиболее электрически нагруженных поверхностей краев электрода [2]. Величины поля на этом рисунке приведены в относительных единицах, относительно наибольшей напряженности на поверхности края фланца с измененным профилем (зависимость 2). Это сделано для того чтобы наглядно представить уровень возможного выравнивания поля. Как можно заключить по рис. 3, посредством оптимизации формы краев фланца по образцу электрода Роговского [3] удастся уменьшить напряженности поля ниже наибольшей напряженности поля на поверхности токопровода:

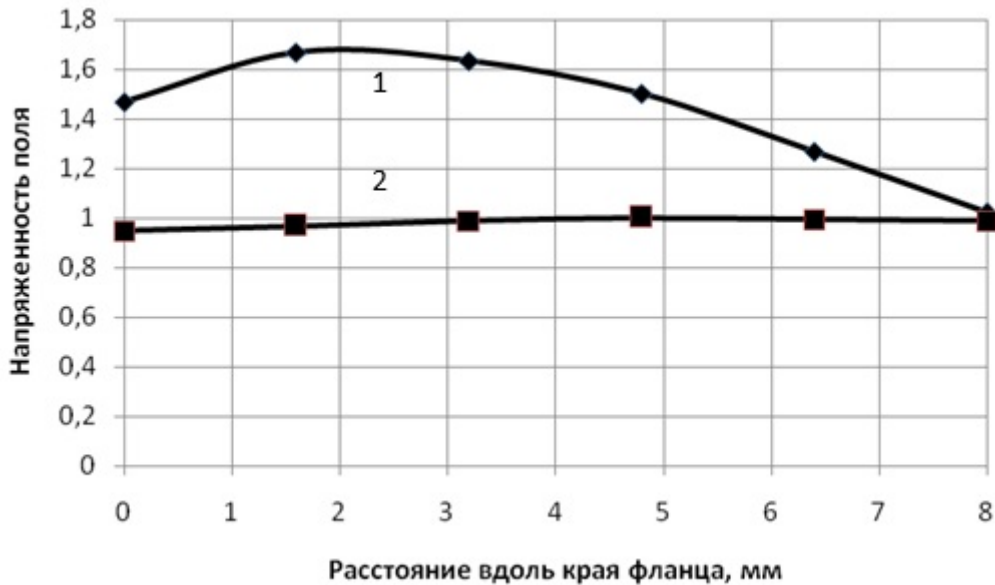


Рис. 3. Распределение напряженности поля вдоль поверхности краев фланца

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 [4]. 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. 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. 2) стеклопластик нагружен электрически значительно слабее, чем резиновая изоляция и этим обстоятельством объясняется неэффективность второй выравнивающей обкладки. Более того технически непросто

нанести на внутренней поверхности опорной втулки покрытие с заданной длиной.

Качественно эффект выравнивания поля проводящим подслоем (экранирующей обкладкой) 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 $C_{2,3}$:

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

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 $C_{0,2}$ возрастает непрерывно с увеличением длины проводящей обкладки, в

тоже время наибольшая емкость $C_{2,3}$ промежуток обкладка – фланец практически ограничивается осевой длиной фланца. Поэтому, для того чтобы следовать условию (7), требуется наносить проводящий слой на опорную трубу на длину примерно равную длине фланца. Следует 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 $\sigma \approx 1 \cdot 10^{-7}$ См/м

На рис. 4 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. А на рис.2 пунктирными линиями (кривая 2) иллюстрирован результат выравнивания поля в наиболее напряженном участке внутренней изоляции введением проводящей обкладки до уровня, соответствующего с условием (6).

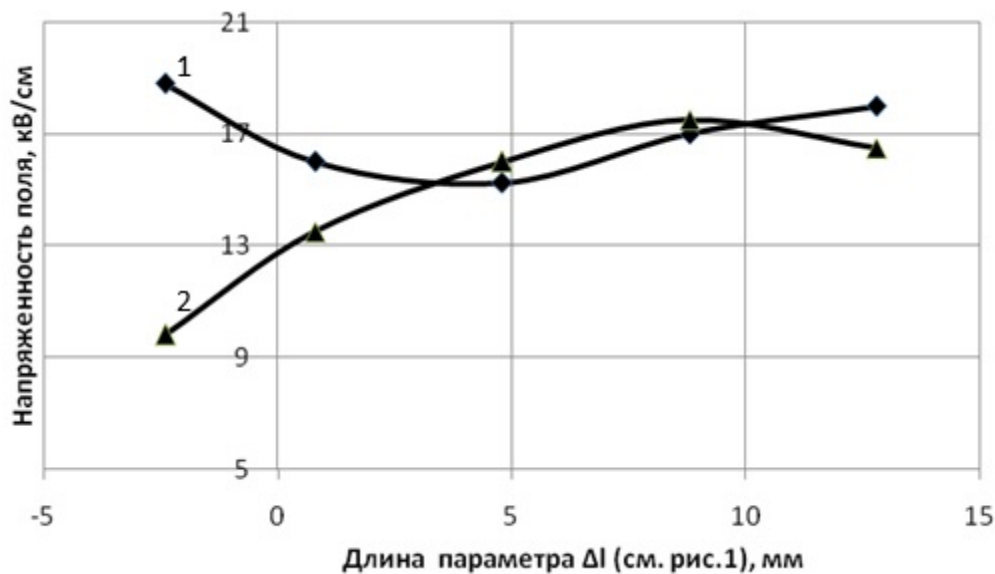


Рис. 4. Зависимости максимальных напряженностей поля на краях фланца и обкладки от взаимного их расположения

Как показывают расчеты, место расположения опорной трубы слабо сказывается на величину максимальной напряженности электрического поля у поверхности торцов фланца. В тоже время, как вытекает из условия (4), чем больше радиус опорной втулки r_1 при выбранной толщине ее стенки Δr тем ниже напряженность у токопровода. Основной функцией опорного элемента является придание необходимой механической устойчивости изолятора к изгибающему возмущению. Поэтому и с этой точки зрения при заданной толщине стенки диаметр трубы должен быть с учетом технологической возможности как можно большей, что увеличивает момент сопротивления этого элемента.

В настоящее время большинство производителей высоковольтных полимерных изоляторов применяют так называемую твердую резину, НТВ. Из-за высокой вязкости исходного материала резина инжектируется в пресс-форму при высоком давлении, порядка 150-250 бар и по-

лимеризация изоляторов осуществляется на 400-500 тоннных машинах. С применением двухкомпонентных эластомеров LSR - жидких силиконовых резин упрощается реализация конструкторских решений, направленных на повышение надежности изоляторов, в том числе, внутренней электрической прочности. Низкая вязкость сырья из жидких резин позволяет при относительно невысоком избыточном давлении (не более 50 бар) добиться полной герметизации узких зазоров между опорным элементом и фланцем, исключить наличие 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 исключается вероятность попадания загрязнений в технологических стыках при многократной заливке.

Выводы

При разработке высоковольтных проходных полимерных изоляторов с целью повышения внутренней электрической прочности рекомендуется:

– предпочтительно выбирать материалы изоляции с близкими диэлектрическими проницаемостями, а соотношения толщин составляющих изоляцию элементов определять в обратной зависимости от их диэлектрических проницаемостей согласно условиям (4), (5). При этом зазор между опорным элементом и внутренней поверхностью фланца должна быть минимальная;

– увеличивать радиус кривизны торцевой части фланца или 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 слабопроводящее покрытие;

– минимизировать технологические факторы, которые могут внести инородные включения в изоляции, особенно, в промежутке фланец – токопровод. В этой связи предпочтительнее использовать в качестве герметизирующей элемента и защитной оболочки материалы с низкой вязкостью.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гордон, Дж. Конструкции, или почему не ломаются вещи [Текст] / Дж. Гордон. - М.: Издательство "Мир", 1980. - 327 с.
2. Ким Е.Д., Назаренко А.В., Карюк Д.Г. Исследование электрического поля высоковольтного проходного изолятора с полимерной изоляцией [Текст] / Е.Д. Ким, А.В. Назаренко, Д.Г. Карюк // Вестник ХГПУ «ХПИ». - 2013. - Выпуск 17. - с. 93-99.
3. Техника высоких напряжений. [Текст] под ред. М.В. Костенко. – М.: «Высшая школа». – 1973. – 528 с.
4. Патент RU(11)2423765(13)C1(51). Способ подбора профиля поверхности электродов для высоковольтных разрядников. Юрьев А.Л., Николаев Д. П., Эльяш С.Л. – 2006.

Поступила в печать 16.10.2013.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Разработка высоковольтных проходных изоляторов с применением полимерных диэлектрических материалов обусловлена низкой удельной энергоемкостью при их изготовлении и устойчивостью к механическим воздействиям в сравнении с фарфоровыми изоляторами. Вместе с тем существует проблемы раннего отказа полимерных изоляторов по причине пробоя изоляции, что требует поиска конструктивных и технологических путей повышения внутренней электрической прочности.

Приведены результаты аналитического исследования электрического поля высоковольтного проходного изолятора с полимерной изоляцией на основе многослойной модели цилиндрического и плоскопараллельного конденсаторов, а также численных решений уравнения Лапласа для комплексной проводимости рассматриваемых областей. Обоснованы оптимальные соотношения между геометрическими параметрами и диэлектрическими характеристиками материалов составных элементов изолятора по критерию минимума наибольшей напряженности поля у поверхности токопровода. Показано возможность существенного демпфирования краевого эффекта поля на стороне торцов фланца выполнением профиля торцов с большим радиусом кривизны по аналогии электрода Роговского. Предложены практические рекомендации по выравниванию распределения напряженности поля у фланца введением экранирующей обкладки путем нанесения проводящего покрытия на наружной поверхности опорной втулки изолятора, дано обоснование наилучшего места расположения покрытия и его протяженности относительно фланца.

Ключевые слова: изолятор, полимер, электрическое поле, отказ, технология, покрытие.

REFERENCES

1. Gordon. Dzh. *Konstruktzii, ili pochemu ne lomayutsya veshchi* [Design, or why do not break things]. Moscow, Mir Publ., 1980. 327 p.
2. Kim E.D., Nazarenko A.V., Karyuk D.G. *Issledovanie elektricheskogo polya vysokovol'nogo prokhdnogo izolyatora s polimernoy izolyatsiey* [Research of the electric field of high voltage bushing polymer insulated]. *Vestnik Khar'kovskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kharkov State Polytechnical University], 2013, no 17, pp. 93-99.
3. Kostenko M.V. *Tekhnika vysokikh napryazheniy* [Technics of high pressure]. Moscow, Vysshaya shkola Publ. 1973. 528 p.
4. Yur'ev A.L., Nikolaev D.P., El'yash C.L. *Sposob podbora profilya poverkhnosti elektrodov dlya vysokovol'tnykh razryadnikov* [The method of selection of the surface profile of electrodes for high-voltage arresters.]. Patent no RU(11)2423765(13)C1(51).

Внешний рецензент *Андриенко П. Д.*

УДК 621.331.3

Е. Д. КИМ (УІПА)

Українська інженерно-педагогічна академія, відділення електротехнологічного факультету, 84100, м. Слов'янськ, Донецька обл., вул. Добровольського, 1, тел.: (06262) 3-33-34

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ПОЛІМЕРНОГО ПРОХІДНОГО ІЗОЛЯТОРА

Розробка високовольтних прохідних ізоляторів із застосуванням полімерних діелектричних матеріалів обумовлена низькою питомою енергоємністю при їх виготовленні і стійкістю до механічних впливів в порівнянні з фарфоровими ізоляторами. Разом з тим існують проблеми ранньої відмови полімерних ізоляторів з причини пробою ізоляції, що вимагає пошуку конструктивних і технологічних шляхів підвищення внутрішньої електричної міцності.

Наведено результати аналітичного дослідження електричного поля високовольтного прохідного ізолятора з полімерною ізоляцією на основі багат шарової моделі циліндричного і плоскопаралельного конденсаторів, а також численних рішень рівняння Лапласа для комплексної провідності розглянутих областей. Обґрунтовано оптимальні співвідношення між геометричними параметрами і діелектричними характеристиками матеріалів складових елементів ізолятора по критерію мінімуму найбільшої напруженості поля у поверхні струмопроводу. Показано можливість істотного демпфювання крайового ефекту поля на стороні торців фланця виконанням профілю торців з великим радіусом кривизни по аналогії електрода Роговського. Запропоновано практичні рекомендації щодо вирівнювання розподілу напруженості поля у фланця введенням екрануючої обкладки шляхом нанесення провідного покриття на зовнішній поверхні опорної втулки ізолятора, дано обґрунтування найкращого місця розташування покриття та його протяжності відносно фланця.

Ключові слова: ізолятор, полімер, електричне поле, відмова, технологія, покриття.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Андрієнко П. Д.*

UDC 621.331.3

E. D. KIM (UESPPI)

Ukrainian Educational-Scientific Professional Pedagogics Institute, Electrotechnological faculty office, 84100, Slovyansk, Donetsk region, 1 Dobrovolskogo Street, tel.: (06262) 3-33-34

OPTIMIZATION OF HIGH-VOLTAGE ELECTRIC FIELD OF POLYMER BUSHING INSULATOR

Development of high voltage bushings using polymeric dielectric materials due to low specific energy in their production and resistance to mechanical stress compared with porcelain insulators. However, there is the problem of early failure of polymeric insulators due to insulation breakdown, which requires the search for constructive and technological ways to improve the internal electrical resistance.

The results of an analytical study of the high-voltage electric field of the output insulator polymer insulated multilayer models of cylindrical and plane-parallel capacitors, as well as numerical solutions of the Laplace equation for the conduction of a comprehensive consideration of areas. The optimal ratio between the geometric parameters and dielectric properties of composite materials insulator elements for minimum criteria for the highest field strength at the surface of the conductor. Shown the possibility of significant damping of the edge effect of the field on the side of the torus samples flange execution profile ends with a large radius of curvature along the lines of the Rogowski electrode. Practical recommendations for equalizing the distribution of the field intensity at the flange introduction shielding electrode by applying a conductive coating on the outer surface of the bearing sleeve insulator, provide a rationale for the best places locations of the coating and its length relative to the flange.

Keywords: insulator, polymer, electric field, failure, technology, cover.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Andrienko P. D.*