

А.А. ЗАДЕРИХИН, студент, НИИВН, Славянск

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ СИСТЕМЫ ОКОНЦЕВАТЕЛЕЙ С ТОРОИДАЛЬНЫМ ЭКРАНОМ

Напряженность электрического поля закінцювачів полімерного ізолятора коригується за допомогою захисного екрана. Аналіз розподілення напруженості можливо виконати, використовуючи математичну модель поля.

Напряженность электрического поля оконцевателей полимерного изолятора корректируется с помощью защитного экрана. Анализ распределения напряженности можно выполнить, используя математическую модель поля.

Линейные полимерные изоляторы в настоящее время широко применяются наряду с традиционными стеклянными и фарфоровыми. Одним из этапов разработки конструкции линейного полимерного изолятора для ЛЭП напряжением 110 кВ и выше является определение конструкции и размеров защитных экранов.

Актуальность данной работы определяется необходимостью иметь представление о напряженности электрического поля на поверхности металлических оконцевателей и экрана для разработки конструкции, на поверхности которой не возникал бы коронный разряд, приводящий к потерям энергии и возникновению радиопомех. Кроме того, электрическое поле повышенной напряженности негативно воздействует на элементы конструкции полимерного изолятора.

Целью данной работы является разработка математической модели и анализ напряженности электрического поля оконцевателей и экрана линейного полимерного изолятора.

Поставленная цель обуславливает необходимость решения следующих задач:

- аналитическое описание образующих поверхности осе симметричных оконцевателей и тороидального экрана;
- расчет напряженности электрического поля на поверхности оконцевателей и экрана с помощью интегрального уравнения Фредгольма первого рода [2, с. 37];
- выбор размеров и расположения экрана, при которых напряженность поля на поверхности оконцевателя не превышает напряжен-

ности возникновения коронного разряда;

– определение направления дальнейшего совершенствования конструкции линейного полимерного изолятора.

Линейный полимерный стержневой изолятор состоит из стеклопластикового стержня, воспринимающего механические нагрузки и защищенного оболочкой из полимерного материала (например, кремнийорганической резины, обладающей высокой гидрофобностью). Защитная оболочка имеет ребра, благодаря чему увеличиваются разрядное расстояние по воздуху и длина пути утечки по поверхности оболочки. На концах стеклопластикового стержня закреплены металлические оконцеватели для крепления изолятора к опорам линий электропередачи и к проводам. Оконцеватели имеют покрытие для защиты от коррозии, представляющее собой, как правило, слой цинка толщиной от 70 до 160 мкм и нанесенный способом горячего оцинкования. Для снижения напряженности электрического поля на поверхности оконцевателей используют тороидальные экраны [3, 8, 9]. Типовая конструкция оконцевателей приведена на рис. 1 [1, 6, 7]. Построим общую схему для нахождения координат узлов на элементах образующей поверхности оконцевателя.

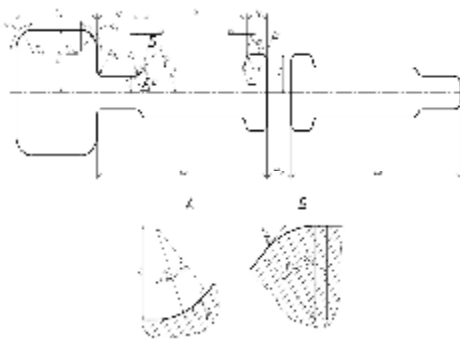


Рис.1. Конфигурация образующей оконцевателей полимерных изоляторов.

Координаты X_j , R_j узлов на образующей находятся по приведенным ниже формулам. Нумерация узлов – сквозная, причем i – локальный номер (в пределах данного участка), j – глобальный номер узла. На первом участке локальный и глобальный номера совпадают ($j=i$), на последующих – к локальному номеру добавляется число узлов на предыдущих участках ($j = i + N_1 + \dots$).

1. Узлы вертикального участка образующей поверхности гнезда (ось системы оконцевателей расположена горизонтально) описываются уравнениями:

$$X_j = -50; R_j = (i - 0,5)\Delta L_{1g}, \quad (1)$$

где $\Delta L_{1g} = (r_{1g} - r_{2g})/N_{1g}$; $\Delta L_j = \Delta L_{1g}$; $i = 1 \dots N_{1g}$; $j = i$.

2. Участок закругления (рис. 2, поз. А):

$$X_j = X_{c12g} + r_{2g} \cos \Theta; R_j = R_{c12g} + r_{2g} \sin \Theta, \quad (2)$$

где $X_{c12g} = -l_{1g} + r_{2g}$; $R_{c12g} = r_{1g} - r_{2g}$ – координаты центра закругления между 1-м и 2-м участками образующей поверхности гнезда;

$$\alpha_1 = \pi/2; i = 1 \dots N_{12g}; j = i + N_{1g}; \Delta\Theta_{12g} = \alpha_1/N_{12g};$$

$$\Theta = \pi - (i - 0,5)\Delta\Theta_{12g};$$

$$\Delta L_j = r_{2g}\Delta\Theta_{12g}.$$

3. Горизонтальный участок образующей поверхности гнезда:

$$X_j = X_{c12g} + (i - 0,5)\Delta L_{2g}; \alpha_1 = \pi/2; \Delta L_j = \Delta L_{2g}, \quad (3)$$

где $\Delta L_{2g} = (l_{1g} - r_{2g} - r_{3g})/N_{2g}$; $i = 1 \dots N_{2g}$; $j = i + N_{1g} + N_{12g}$.

4. Участок закругления (рис. 2, поз. В):

$$X_j = X_{c23g} + r_{3g} \cos \Theta; R_j = R_{c23g} + r_{3g} \sin \Theta, \quad (4)$$

где $X_{c23g} = r_{3g}$; $R_{c23g} = r_{1g} - r_{3g}$ – координаты центра закругления между 2-м и 3-м участками образующей поверхности гнезда;

$$\alpha_4 = \pi/2; i = 1 \dots N_{23g}; j = i + N_{1g} + N_{12g} + N_{2g}; \Delta\Theta_{23g} = \alpha_4/N_{23g};$$

$$\Theta = \pi/2 - (i - 0,5)\Delta\Theta_{23g}; \Delta L_j = r_{3g}\Delta\Theta_{23g}.$$

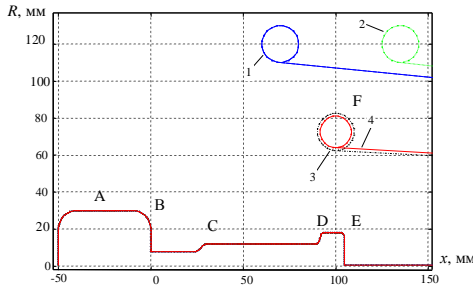


Рис. 2. Схема расположения узлов на образующей осесимметричного оконцевателя и экрана.

5. Вертикальный участок образующей поверхности гнезда:

$$X_j = 0; R_j = r_{1g} - r_{3g} - (i-0,5)\Delta L_{3g}, \quad (5)$$

где $\Delta L_{3g} = (r_{1g} - r_{3g} - r_1 - r_{4g}) / N_{3g}; i = 1 \dots N_{3g}; j = i + N_{1g} + N_{12g} + N_{2g} + N_{23g}; \Delta L_j = \Delta L_{3g}.$

6. Участок закругления:

$$X_j = X_{c3g2} + r_{4g} \cos \Theta; R_j = R_{c3g2} + r_{4g} \sin \Theta, \quad (6)$$

где $X_{c3g2} = r_{4g}; R_{c3g2} = r_1 + r_{4g}$ – координаты центра закругления между 3-м участком образующей поверхности гнезда и 2-м участком образующей поверхности оконцевателя;

$$i = 1 \dots N_{3g2}; j = i + N_{1g} + N_{12g} + N_{2g} + N_{23g} + N_{3g}; \Delta \Theta_{3g2} = \alpha_4 / N_{3g2};$$

$$\Theta = \pi + (i-0,5)\Delta \Theta_{3g2}; \Delta L_j = r_{4g}\Delta \Theta_{3g2}.$$

Число узлов на образующей поверхности гнезда

$$N_g = N_{1g} + N_{12g} + N_{2g} + N_{23g} + N_{3g} + N_{3g2}.$$

7. Горизонтальный участок образующей поверхности оконцевателя:

$$X_j = r_{4g} + (i-0,5)\Delta L_2; R_j = r_1, \quad (7)$$

где $\Delta L_2 = (l_2 - r_{4g} - r_5 \operatorname{tg} \beta_2) / N_2; \alpha_2 = \pi / 4; \beta_2 = \alpha_2 / 2; i = 1 \dots N_2; j = i + N_g; \Delta L_j = \Delta L_2.$

8. Участок закругления:

$$X_j = X_{c23} + r_5 \cos \Theta; R_j = R_{c23} + r_5 \sin \Theta, \quad (8)$$

где $X_{c23} = l_2 - r_5 \operatorname{tg} \beta_2; R_{c23} = r_1 + r_2$ – координаты центра закругления между 2-м и 3-м участками образующей поверхности оконцевателя;

$$i = 1 \dots N_{23}; j = i + N_g + N_2; \Delta \Theta_{23} = 2\beta_2 / N_{23}; \Theta = -\pi / 2 + (i-0,5)\Delta \Theta_{23};$$

$$\Delta L_j = r_5\Delta \Theta_{23}.$$

9. Коническая часть оконцевателя:

$$X_j = X_{n3} + (i-0,5)\Delta L_3 \cos \alpha_2; R_j = R_{n3} + (i-0,5)\Delta L_3 \sin \alpha_2, \quad (9)$$

где $X_{c34} = l_2 + l_3 + r_6 \operatorname{tg} \beta_2; R_{c34} = r_2 - r_6$ – координаты центра закругления между 3-м и 4-м участками образующей поверхности оконцевателя;

$$X_{n3} = X_{c23} + r_5 \cos(-\pi / 2 + 2\beta_2); R_{n3} = R_{c23} + r_5 \sin(-\pi / 2 + 2\beta_2);$$

$$X_{k3} = X_{c34} + r_6 \cos(\pi / 2 + 2\beta_2); R_{k3} = R_{c34} + r_6 \sin(\pi / 2 + 2\beta_2)$$

– координаты начала и конца 3-го участка соответственно;

$$L_3 = \sqrt{(X_{k3} - X_{n3})^2 + (R_{k3} - R_{n3})^2};$$

$$\Delta L_3 = L_3 / N_3; i = 1 \dots N_3; j = i + N_g + N_2 + N_{23}; \Delta L_j = \Delta L_3.$$

10. Участок закругления (рис. 2, поз. С):

$$X_j = X_{c34} + r_6 \cos \Theta; R_j = R_{c34} + r_6 \sin \Theta, \quad (10)$$

где $\Theta = \pi/2 + 2\beta_2 + (i-0,5)\Delta\Theta_{34}$; $i = 1 \dots N_{34}$; $j = i + N_g + N_2 + N_{23} + N_3$;
 $\Delta\Theta_{34} = 2\beta_2 / N_{34}$; $\Delta L_j = r_6 \Delta\Theta_{34}$.

11. Горизонтальный участок образующей поверхности оконцевателя:

$$X_j = X_{c34} + (i-0,5)\Delta L_4; R_j = r_2, \quad (11)$$

где $\Delta L_4 = (l_4 - r_6 \operatorname{tg} \beta_3) / N_4$; $\alpha_3 = 5\pi/12$; $\beta_2 = \alpha_3/2$; $i = 1 \dots N_4$;
 $j = i + N_g + N_2 + N_{23} + N_3 + N_{34}$; $\Delta L_j = \Delta L_4$.

12. Участок закругления:

$$X_j = X_{c45} + r_7 \cos \Theta; R_j = R_{c45} + r_7 \sin \Theta, \quad (12)$$

где $X_{c45} = l_2 + l_3 + l_4 - r_7 \operatorname{tg} \beta_3$; $R_{c45} = r_2 + r_7$ – координаты центра закругления между 4-м и 5-м участками образующей поверхности оконцевателя;
 $i = 1 \dots N_{45}$; $j = i + N_g + N_2 + N_{23} + N_3 + N_{34} + N_4$; $\Delta\Theta_{45} = 2\beta_3 / N_{45}$;

$$\Theta = -\pi/2 + (i-0,5)\Delta\Theta_{45}; \Delta L_j = r_7 \Delta\Theta_{45}.$$

13. Коническая часть оконцевателя:

$$X_j = X_{n5} + (i-0,5)\Delta L_5 \cos \alpha_3; R_j = R_{n5} + (i-0,5)\Delta L_5 \sin \alpha_3, \quad (13)$$

где $X_{n5} = X_{c45} + r_7 \cos(-\pi/2 + 2\beta_3)$; $R_{n5} = R_{c45} + r_7 \sin(-\pi/2 + 2\beta_3)$;

$X_{k5} = X_{c56} + r_8 \cos(\pi/2 + 2\beta_3)$; $R_{k5} = R_{c56} + r_8 \sin(\pi/2 + 2\beta_3)$ – координаты начала и конца 5-го участка соответственно;

$X_{c56} = l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + r_8 \operatorname{tg} \beta_3$; $R_{c56} = r_3 - r_8$ – координаты центра закругления между 5-м и 6-м участками образующей поверхности оконцевателя;

$$L_5 = \sqrt{(X_{k5} - X_{n5})^2 + (R_{k5} - R_{n5})^2};$$

$$\Delta L_5 = L_5 / N_5; i = 1 \dots N_5;$$

$$j = i + N_g + N_2 + N_{23} + N_3 + N_{34} + N_4 + N_{45}; \Delta L_j = \Delta L_5.$$

14. Участок закругления (рис. 2, поз. D):

$$X_j = X_{c56} + r_8 \cos \Theta; R_j = R_{c56} + r_8 \sin \Theta, \quad (14)$$

где $\Theta = \pi/2 + 2\beta_3 - (i-0,5)\Delta\Theta_{56}$; $i = 1 \dots N_{56}$;

$$j = i + N_g + N_2 + N_{23} + N_3 + N_{34} + N_4 + N_{45} + N_5; \Delta\Theta_{56} = 2\beta_3 / N_{56}; \Delta L_j = r_8 \Delta\Theta_{56}.$$

15. Горизонтальный участок образующей поверхности оконцевателя:

$$X_j = X_{c56} + (i-0,5)\Delta L_6; R_j = r_3, \quad (15)$$

где $\Delta L_6 = (l_6 - r_8 \operatorname{tg} \beta_3 - r_9) / N_6$; $\Delta L_j = \Delta L_6$; $i = 1 \dots N_6$;

$$j = i + N_g + N_2 + N_{23} + N_3 + N_{34} + N_4 + N_{45} + N_5 + N_{56}.$$

16. Участок закругления (рис. 2, поз. Е):

$$X_j = X_{c67} + r_9 \cos \Theta; R_j = R_{c67} + r_9 \sin \Theta, \quad (16)$$

где $X_{c67} = l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6 - r_9$; $R_{c67} = r_3 - r_9$ – координаты центра закругления между 6-м и 7-м участками образующей поверхности оконцевателя;

$$i = 1 \dots N_{67}; j = i + N_g + N_2 + N_{23} + N_3 + N_{34} + N_4 + N_{45} + N_5 + N_{56} + N_6;$$

$$\Delta \Theta_{67} = \alpha_4 / N_{67}; \Theta = \pi / 2 - (i - 0,5) \Delta \Theta_{67}; \Delta L_j = r_9 \Delta \Theta_{67}.$$

17. Вертикальный участок образующей поверхности оконцевателя:

$$X_j = l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6; R_j = r_3 - r_9 - (i - 0,5) \Delta L_7, \quad (17)$$

где $\Delta L_7 = (r_3 - r_9) / N_7$; $i = 1 \dots N_7$;

$$j = i + N_g + N_2 + N_{23} + N_3 + N_{34} + N_4 + N_{45} + N_5 + N_{56} + N_6 + N_{67}; \Delta L_j = \Delta L_7.$$

Координаты узлов на образующей второго оконцевателя находят с помощью аналогичных формул с учетом зеркального расположения оконцевателей и расстояния между ними [4, 5].

Координаты узлов на образующей тороидального экрана находят по следующим формулам:

$$X_j = R_2 \cos \Theta + X_0; R_j = R_2 \sin \Theta + R_1, \quad (18)$$

где X_0, R_1 – координаты центра образующей экрана (окружности);

$$\Theta = -\pi + (i - 0,5) \Delta \Theta_e; i = 1 \dots N_e; j = i + N_{o1} + N_{o2};$$

$$\Delta \Theta_e = 2\pi / N_e,$$

где N_{o1}, N_{o2} – количество узлов на образующих первого и второго оконцевателей соответственно;

$$\Delta L_j = R_2 \Delta \Theta_e.$$

Соотношения (1) – (18) описывают в общем виде конфигурацию образующей оконцевателя и экрана. При заданных значениях радиусов закруглений ($r_{1g}=30$; $r_{2g}=10$; $r_{3g}=10$; $r_{4g}=0,05$; $r_1=7,9$; $r_2=12$; $r_3=18$; $r_4=5$; $r_5=3$; $r_6=3$; $r_7=2$; $r_8=2$; $r_9=2$) и длин ($l_{1g}=50$; $l_2=25$; $l_3=4,1$; $l_4=61,5$; $l_5=1,6$; $l_6=12,4$; $H_{из}=1000$) (все размеры в миллиметрах) получены координаты 358 узлов.

На рис. 3 приведены развертки напряженности поля (зависимости напряженности от длины образующей). Расчеты выполнены для изолятора класса 70/110 и ряда вариантов исполнения экрана (таблица 1).

Величина напряженности поля в точке А не учитывается, так как при закреплении изолятора на опоре ЛЭП экранирующий эффект про-

вода проявляется в значительном снижении напряженности электрического поля в данной точке.

Анализ картины напряженности поля при различных значениях размеров экрана и его расположении показывает, что экран необходимо размещать не ниже, чем на уровне верхней кромки раструба оконцевателя, на который подан высокий потенциал. Расстояние от экрана до поверхности нижнего ребра должно составлять не менее 20...25 мм. Большой диаметр тороидального экрана равен 145 мм, малый диаметр – 17 мм.

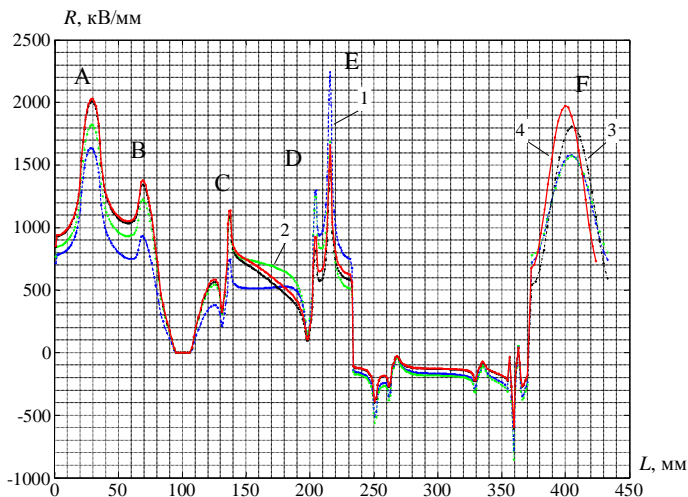


Рис. 3. Развертки напряженности электрического поля при различных размерах и расположениях экрана (табл. 1).

Таблица 1 – Параметры тороидальных экранов

№ кривой на рис.3	Параметры		
	Большой диаметр экрана	Малый диаметр экрана	Расстояние от края электрода
1	240	20	120
2	240	20	185
3	145	20	150
4	145	17	150

В дальнейшем при исследовании электрического поля линейного полимерного изолятора необходимо учесть, во-первых, наличие защитного экрана на заземленном оконцевателе при более высоких напряжениях, и, во-вторых, варианты конструкции экрана (например, экран, состоящий из двух или трех тороидальных элементов).

Литература. 1. *Анурьев В.И.* Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х т. Т. 1. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1978. – 728 с. 2. *Набока Б.Г.* Розрахунки електростатичних полів в електроізоляційній техніці: Навч. посібник для студентів електроенергетичних спеціальностей. – Київ: ІСДО, 1995. – 120 с. 3. *Шумилов Ю.Н.* Полимерные изоляторы для линий электропередачи высокого напряжения. – Препринт, 2005. – 127 с. 4. Правила устройства электроустановок. – СПб.: Издательство ДЕАН, 2003. – 928 с. 5. ГКД 34.51.101-96. Инструкция по выбору и эксплуатации внешней изоляции электроустановок 6-750 кВ на предприятиях Минэнерго Украины. – Введена 01.07.1999. 6. ГОСТ 11359-75. Арматура линейная. Ряд разрушающих нагрузок. Сопряжения деталей. Параметры и размеры. – Введен 01.01.77. 7. ГОСТ 27396-93 (МЭК 120-84). Арматура линейная. Сферические шарнирные соединения изоляторов. Размеры. – Введен 01.01.1995. 8. ГОСТ 28856-90. Изоляторы линейные подвесные стержневые полимерные. Общие технические условия. – Введен 01.01.92. 9. СОУ МПЕ 40.1.51.301:2004. Ізолятори лінійні підвісні стрижньові полімерні. Технічні умови. – Введені 01.03.2005.

Поступила в редколлегию 16.04.2009