

В. В. РУДАКОВ, д-р техн. наук, профессор, НТУ «ХПИ»;

В. Е. МАРЦЕНЮК, ст. преп., НТУ «ХПИ»;

С. В. РУДАКОВ, канд. техн. наук, доцент, УНГЗУ

ГРАДИРОВАНИЕ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ КОАКСИАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Приведены результаты расчета двухслойной изоляции коаксиальных цилиндрических электродов при постоянном радиусе внешнего электрода. Определена зависимость одинаковой максимальной напряженности поля в слоях от соотношения радиусов электродов. Рассчитаны значения максимальных напряженностей поля в бумажно-масляной изоляции разной плотности, соответствующие одинаковым ресурсам

Ключевые слова: градирование изоляции, высокое напряжение, ресурс.

Введение. Регулирование электрических полей путем градирования изоляции достаточно широко применяется в конструкциях различных высоковольтных устройств (высоковольтные вводы, коаксиальные системы обострения формы импульса напряжения, высоковольтные кабели, конденсаторы и др.) [1]. Суть эффекта градирования изоляции заключается в применении комбинации диэлектриков с различными диэлектрическими проницаемостями, с размещением диэлектриков с повышенным значением диэлектрической проницаемости в зонах наибольшей неоднородности электрического поля. Для коаксиальных электродов с многослойным диэлектриком в работе [2] решена задача по определению размеров расположения многослойной изоляции при постоянном радиусе наружного электрода, по результатам которой приведены примеры выполнения градирования изоляции, улучшающие распределение электрического поля в промежутке. При анализе задачи в работе [2] допущена неточность, приведшая к неверному заключению о возможности выполнения двухслойной изоляции (рис. 1) с абсолютно оптимальными отношением радиусов и соответствующим отношением диэлектрических проницаемостей слоев:

$$\frac{r_3}{r_1} = 2,226; \quad \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = 1,557.$$

На рис. 1 r_1, r_2, r_3 – соответственно радиусы внутреннего электрода, границы раздела диэлектрических сред с диэлектрическими проницаемостями ε_1 и ε_2 , внешнего электрода.

Критерием оптимизации служило достижение одинаковых минимальных значений максимальных напряженностей электрического поля в слоях диэлектриков (на поверхности электрода и на границе раздела диэлектриков).

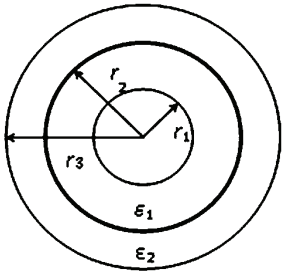


Рисунок 1 – Расчетная схема

Целью настоящей статьи является:

1. Уточнение решения задачи об оптимальном расположении слоев двухслойной изоляции при различных соотношениях диэлектрических проницаемостей слоев.

2. Определение оптимального расположения слоев, имеющих одинаковый ресурс, с учетом зависимости электрической прочности диэлектриков от соотношения диэлектрических проницаемостей слоев на примере бумажно-масляной изоляции.

Постановка задачи 1. Найти соотношение между диэлектрическими проницаемостями слоев ε_1 и ε_2 , и радиусами r_1 , r_2 и r_3 , при которых максимальная напряженность поля на поверхности внутреннего электрода и на границе раздела сред одинакова и имеет минимальное значение (примем $r_3 = \text{const.}$). Для этого случая должны выполняться условия [3]

$$\varepsilon_1 r_1 = \varepsilon_2 r_2, \quad (1)$$

$$E_{\max 1} = \frac{U_0}{\varepsilon_1 r_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \right)}, \quad (2)$$

$$E_{\max 2} = \frac{U_0}{\varepsilon_2 r_2 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \right)}, \quad (3)$$

где U_0 – напряжение между электродами.

Введем обозначения $\gamma = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} > 1$, $m = \frac{r_3}{r_1} > 1$.

Найдем экстремум $E_{\max 1}$ полагая, что $m \neq \text{const}$, $r_3 = \text{const}$, а γ – переменная величина, то есть для каждого конкретного отношения радиусов электродов m определим γ , при которой γ будет иметь минимальное значение. При этом радиус r_2 границы раздела диэлектрических слоев, как и отношение, γ будут переменными величинами, причем $\gamma r_1 = r_2$ [3]. Определяем первую производную по γ и приравняем нулю

$$\frac{\partial E_{\max 1}}{\partial \gamma} = \frac{\partial}{\partial \gamma} \left| \frac{U_0 m}{r_3 \left(\ln \gamma + \gamma \ln \frac{m}{\gamma} \right)} \right| = 0. \quad (4)$$

После вычисления производной и преобразований

$$\gamma \ln m = 1 - \frac{1}{\gamma} \quad (5)$$

или

$$m = \gamma e^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}. \quad (6)$$

Выражение (6) близко к линейной функции. Например, с точностью до 5 % выражение (6) можно представить в виде $m = 2,531 \gamma - 1,633$. Таким образом, для каждого значения m существует определенное значение γ соответствующее минимальным и одинаковым значениям $E_{\max 1}$ и $E_{\max 2}$.

Введем $E_{cp.0} = \frac{U_0}{r_3} = \text{const}$ – условное среднее значение напряженности

электрического поля при $r_1 \rightarrow 0$, $\left(E_{cp.0}(r_1) = \frac{U_0}{r_3 - r_1} \right)$.

В случае однородного диэлектрика при $\gamma = 1$ формула (5) неприменима, поскольку исходное выражение (2) не будет содержать γ . Известно [4], что при $\gamma = 1$ и $m = 2,72$ максимальная напряженность электрического поля имеет минимальное значение, равное $2,72E_{cp.0}$. Определим η – отношение максимальной напряженности электрического поля к $E_{cp.0}$ для конкретных значений m и соответствующих значений γ ($\gamma \neq 1$), для которых выполняется условие $E_{\max 1} = E_{\max 2}$ с учетом (6)

$$\eta = \frac{E_{\max 1}}{E_{cp.0}} = \frac{m}{\ln \gamma + \gamma \ln \left(\frac{m}{\gamma} \right)} = \frac{\gamma e^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{\ln \gamma + \gamma - 1}. \quad (7)$$

Зависимость (7) устанавливает соответствие (рис. 2) между минимальными значениями η для каждой пары значений m и γ , связанных условием (6).

Определим γ , для которого η принимает минимальные значения, взяв производную по γ и приравняв ее к нулю

$$\frac{\partial \eta}{\partial \gamma} = \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) (\ln \gamma - 1) = 0. \quad (8)$$

Откуда $\gamma = e$, что соответствует минимальному значению зависимости η от γ , приведенной на рис. 2. Таким образом, абсолютно оптимальными отношением радиусов и соответствующим отношением диэлектрических проницаемостей слоев при данной постановке задачи следует считать:

$$\frac{r_3}{r_1} = 5,11; \quad \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = e.$$

Анализ зависимости $\eta = f(\gamma)$ показывает, что значения γ , при которых η превосходит минимальные значения не более чем на 10%, имеют широкий интервал изменения от $\gamma \approx 1,5$ до $\gamma \approx 5$, а соответствующие им значения m согласно выражению (6) – от $m = 2,16$ до $m = 11$.

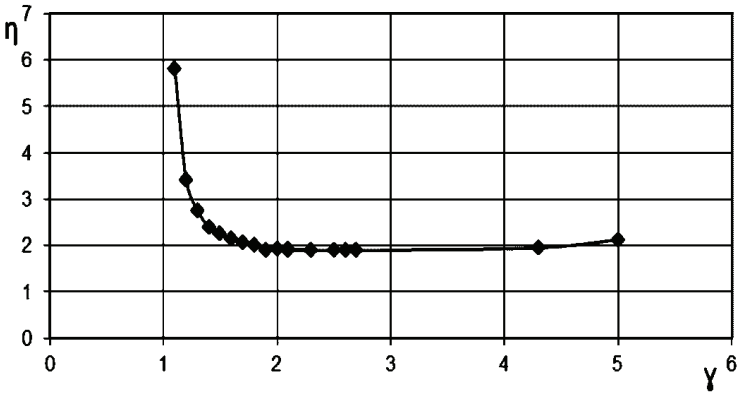


Рисунок 2 – Зависимость η от γ

Постановка задачи 2. Найти соотношение между диэлектрическими проницаемостями слоев ε_1 и ε_2 , и радиусами r_1 , r_2 и r_3 , при которых максимальная напряженность поля на поверхности внутреннего электрода и на границе раздела сред соответствует одинаковым ресурсам слоев. Как правило, с увеличением плотности одного и того же материала увеличивается его диэлектрическая проницаемость, а также электрическая прочность, например, для конденсаторной бумаги [5]. Поэтому условием равно прочности слоев в предположении отсутствия тепловых процессов будем считать равенство ресурсов каждого слоя. При этом максимальные напряженности в слоях будут отличаться. Введем обозначение

$$\beta = \frac{E_{\max 1}}{E_{\max 2}}, \quad (9)$$

полагая, что $E_{\max 1} > E_{\max 2}$ а их значения соответствуют электрической прочности слоя 1 и слоя 2 соответственно.

В накопительных высоковольтных импульсных емкостных устройствах коаксиального типа с медленным зарядом, быстрым разрядом и небольшой частотой следования импульсов имеет смысл выполнять диэлектрик 1 из бумажной (кабельной) изоляции большой плотности, а диэлектрик 2 – меньшей. При этом должны быть подавлены эффекты теплового старения, что обеспечивается низкой частотой следования импульсов. В таблице приведены значения относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\text{ЭКВ}}$ широко применяемых бумажных диэлектриков различной плотности, пропитанных диэлектрическими жидкостями, рассчитанной по формуле [6]

$$\varepsilon_{\text{ЭКВ}} = \frac{\varepsilon_{\text{кл}} \varepsilon_{\text{д}}}{\left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{кл}}}\right) \varepsilon_{\text{кл}} + \frac{\rho}{\rho_{\text{кл}}} \varepsilon_{\text{д}}}, \quad (10)$$

где $\rho_{\text{кл.}}$ – плотность клетчатки, ($1,55 \text{ г/см}^3$); ρ – плотность бумаги; $\epsilon_{\text{кл.}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость клетчатки, ($\epsilon_{\text{кл.}} = 6,6$); $\epsilon_{\text{д}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость жидкого диэлектрика ($\epsilon_{\text{д}} = 2,2$ для трансформаторного масла, $\epsilon_{\text{д}} = 4,6$ – для касторового масла).

Таблица – Значения $\epsilon_{\text{эжв}}$ пропитанной маслами конденсаторной бумаги

Плотность бумаги г/см ³	0,8	1	1,2	1,35
Жидкий диэлектрик				
Трансформаторное масло	3,353	3,859	4,546	5,246
Касторовое масло	5,451	5,718	6,010	6,249

По результатам таблицы определены отношения диэлектрической проницаемости бумаги с большей плотностью к меньшей. Например, если в составе слоя 1 использовать бумагу плотностью $1,2 \text{ г/см}^3$, а в качестве слоя 2 – $0,8 \text{ г/см}^3$, пропитанные трансформаторным маслом, то $\gamma_1 = 1,35$. При пропитке бумаге плотностью $1,35 \text{ г/см}^3$ и 1 г/см^3 касторовым маслом γ соответственно составит $\gamma_2 = 1,09$.

Для определения длительной электрической прочности в зависимости от плотности бумаги проведены испытания в импульсном режиме бумажно-касторовой изоляции пластинчатых секций при напряженности электрического поля 135 кВ/мм , частоте разрядного тока 100 кГц , декременте колебаний $1,38$ и частоте следования импульсов $2,7 \text{ Гц}$. Испытания показали, что с увеличением плотности бумаги от 1 г/см^3 до $1,35 \text{ г/см}^3$ ресурс увеличивается в ~ 6 раз (рис. 3). Учитывая, что напряженность электрического поля обратно пропорционально ресурсу в степени $\sim 0,167$ [6], принимаем, что при одном и том же ресурсе электрическая прочность бумаги плотностью 1 г/см^3 меньше электрической прочности бумаги плотностью $1,35 \text{ г/см}^3$ в $\beta \approx 1,3$ раза. Согласно формулам (2) и (3) и рис. 3 наименьшее значение максимальной напряженности и одинаковое в 2-х слоях будет достигнуто при $\gamma = 1,09$.

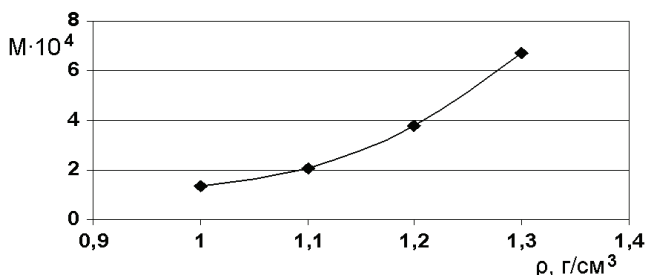


Рисунок 3 – Зависимость среднего срока службы секций импульсных конденсаторов с пропиткой касторовым маслом от плотности конденсаторной бумаги

Однако максимальная напряженность поля в слое 2 должна превысить

ожидаемое для заданного ресурса значение напряженности поля $\beta \approx 1,3$ раза. Чтобы добиться одинаковых условий по ресурсу в обоих слоях необходимо, чтобы выполнялось равенство $E_{\max 1} = 1,3 E_{\max 2}$. Это возможно, если $r_2/r_1 = \beta\gamma = 1,42$ без изменения отношения радиуса наружного электрода к радиусу внутреннего (m) в отличие от первой задачи. Т.е. если для задачи 1 r_1, r_2 являются переменными величинами, то в данной задаче переменной является только r_2 . При этом должно выполняться условие $\beta\gamma < m$. Если $\beta\gamma > m$, то r_2 станет больше r_3 , что лишено физического смысла. Преобразуем

(2) с учетом того, что $\frac{E_{\max 1}}{E_{\max 2}} > 1$, а

$$\frac{r_2}{r_1} = \beta\gamma; \quad \frac{r_2}{r_3} = \frac{\beta\gamma}{m}, \quad (11)$$

$$\eta = \frac{E_{\max 1}}{E_{cp.0}} = \frac{m}{\ln m - (\gamma - 1) \ln \frac{\beta\gamma}{m}} \quad (12)$$

и найдем η , полагая, что β – постоянная, а γ – переменная величины.

Определим минимальное значение η в зависимости от m , приравняв нулю производную от η по γ из (12)

$$\gamma \ln m - (\gamma - 1) \ln \beta\gamma - \gamma = 0, \quad (13)$$

откуда

$$m = e(\beta\gamma)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}, \quad (14)$$

где e – основание натурального логарифма.

Тогда для варианта с бумагой, пропитанной трансформаторным маслом $\gamma_1 = 1,35$, а для пропитанной касторовым маслом – $\gamma_2 = 1,09$, и с учетом для обоих вариантов $\beta \approx 1,3$, соответствующие значения m составят $m_1 = 3,14$ и $m_2 = 2,8$. Эти значения m близки к варианту заполнения зазора между электродами одним диэлектриком, когда $m_0 = e = 2,72$. Если применить двухслойную бумажную изоляцию, пропитанную трансформаторным маслом, то коэффициент η_1 , вычисленный по формуле (12) составит 2,33. В случае пропитки касторовым маслом – $\eta_2 = 2,57$. Таким образом, выигрыш по максимальной напряженности электрического поля в случае применения двухслойного диэлектрика по сравнению с однослойным будет небольшим. В приведенных задачах 1 и 2 будет достигнуто уменьшение напряженности поля соответственно в 1,17 раза и в 1,06 раза по сравнению с однослойным вариантом, для которого $\eta_0 = e$. Это приведет к увеличению ресурса соответственно в 2,56 раза и в 1,4 при больших напряженностях поля, характерных, например, для высоковольтных импульсных конденсаторов [6]. Для длительно работающих систем (малых напряженностей поля в случае кабельных конструкций) это увеличение составит 5,6 и 1,9, поскольку в этом случае,

напряженность электрического поля обратно пропорционально ресурсу в степени $\sim 0,09$ [7].

Для двухслойных систем с другими значениями m при тех же γ изменится β , что приведет к неодинаковым ресурсам по слоям и уменьшению ресурса системы в целом.

Выводы.

1. Определена зависимость относительной максимальной напряженности электрического поля η в коаксиальной конструкции электродов с двухслойным диэлектриком от соотношения диэлектрических проницаемостей γ , радиусов электродов m при постоянном значении радиуса внешнего электрода. Минимальное η соответствует $\gamma = 2,72$ и $m = 5,1$ при одинаковых значениях максимальных напряженностей электрического поля в слоях.

2. Приведена экспериментальная зависимость ресурса от плотности бумажно-масляной изоляции в импульсном режиме работы. Показано, что для бумажно-масляной изоляции в диапазоне плотностей бумаги от 1,0 до 1,35 (для трансформаторного масла) ресурс может увеличиваться до 6 раз.

3. Для двухслойной бумажно-масляной изоляции с равным расчетным ресурсом слоев, но с разными значениями максимальной напряженности электрического поля в слоях ожидается увеличение ресурса до 2,56 по отношению к ресурсу однослойной изоляции. При этом отношение радиусов электродов составляет $m_1 = 3,14$ (для трансформаторного масла) и $m_2 = 2,8$ (для касторового масла).

Список литературы: 1. Бейер М., Бек В., Меллер К., Цаенгель В. Техника высоких напряжений: Теоретические и практические основы применения : Пер. с нем. / Под ред. В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с. 2. Рудаков В.В., Рудаков С.В. Оптимизация конструкции коаксиального кабеля с многослойным диэлектриком // Электротехника и электромеханика. – 2004. – № 4. – С. 70-73. 3. Основы кабельной техники : Учебн. пособие для вузов / Под ред. В.А. Приведенцева. Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 472 с. 4. Рудаков В.В. Срок службы кабельной изоляции как функция «напряженного объема» // Техническая электродинамика. – 1998. – № 5. – С. 8-10. 5. Карабанов В.И., Сочнев Г.К. Бумаги повышенной плотности для производства конденсаторов с высокой удельной энергией // Электронная промышленность. – 1976. – Вып. 2. – С. 32-35. 6. Кучинский Г.С. Высоковольтные импульсные конденсаторы. – Л.: Энергия, 1973. – 176 с. 7. Багелис Д.С., Белегуссов Н.И., Саакян А.Е. Справочник по кабелям. – М.: Энергия, 1971. – 704 с.

УДК 621.315.2

Градуирование изоляции высоковольтных импульсных коаксиальных конструкций / В. В. Рудаков, В. Е. Марценюк, С. В. Рудаков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2013. – № 60 (1033). – С. 115-122. – Бібліогр.: 7 назв.

Приведені результати розрахунку двохшарової ізоляції коаксіальних циліндричних електродів постійного радіусу зовнішнього електроду. Визначена залежність однакової максимальної напруженості поля у шарах ізоляції від співвідношення радіусів електродів. Обчислені значення максимальної напруженості у паперово-масляної ізоляції різної щільності, що відповідають однаковим ресурсам.

Ключові слова: градування ізоляції, висока напруга, ресурс.

The results of the calculation of a two-layer insulation of coaxial cylindrical electrodes with a constant radius of the outer electrode were given. The same maximum field strength in the layers dependence on the ratio of the electrodes radii was determined. The values of the maximum field strength in paper-oil insulation of different densities, which are corresponding to the same service lives were calculated.

Keywords: insulation calibration, high voltage, service life.