

ОСОБЛИВОСТІ ВИБОРУ РОБОЧОЇ НАПРУЖЕНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ В КОМБІНОВАНІЙ ІЗОЛЯЦІЇ АПАРАТІВ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

Галушко В.В., студентка, Галдецький П.О., студент, Ковалевський М.В., студент, Проценко О.Р., к.т.н., доц.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Вступ. При конструюванні електричних апаратів високої напруги виникають ситуації, коли провідні елементи, які знаходяться під різними потенціалами, розташовані досить близько один до одного, або, навіть, контактують один з одним. При цьому кожен провідник має тверду ізоляцію, товщина якої розраховується виходячи з допустимої найбільшої робочої напруженості, міцність якої достатня, щоб витримати прикладену до неї напругу. Оптимізація масо-габаритних характеристик різноманітних високовольтних апаратів призводить до того, що така ситуація може спостерігатись все частіше і частіше.

Зазвичай вся конструкція апарату розміщується в металевому бакові, простір в якому заповнюється трансформаторним маслом, яке відіграє роль електроізоляційного та охолоджуючого середовища. Найбільш поширеним (але не єдиним) прикладом такої конструкції є конструкція трансформатору струму ланцюгового типу серії ТФН, у якому первинна та вторинна обмотки знаходяться у безпосередньому контакті одна з одною.

Взагалі провідні елементи можуть перетинатися під різними кутами – від кута в 90 градусів, до випадку, коли вони проходять паралельно один одному. Як в першому, так і в другому випадках між двома ізольованими провідниками утворюється простір заповнений ізолюючою рідиною (трансформаторним маслом). Форма цього простору є конічною з вершиною у місці дотику двох ізольованих поверхонь провідників та носить назву «масляний клин». Незважаючи на вибір робочої напруженості у твердих ізоляційних матеріалах ізоляції провідників за допустимими значеннями, у зв'язку з різними значеннями діелектричних проникностей твердих та рідких діелектриків, існують умови, коли на певній ділянці «масляного клину» напруженість електричного поля може перевищувати електричну міцність рідкої ізоляції. Це зазвичай призводить до виникнення електричного розряду у цій зоні, що у більшості випадків веде до подальшого пробоя твердої ізоляції та до аварії електричного апарату.

Мета роботи: дослідити умови та визначити зони в яких напруженість електричного поля в «масляному клині» перевищує електричну міцність трансформаторного масла при використанні паперової ізоляції.

Матеріали і результати досліджень. Два ізольованих провідника, які мають різні потенціали, можуть дотикатись один до одного. На малюнку представлені два варіанти – коли ці проводи перехрещуються (рис. 1) або проходять паралельно (рис. 2).

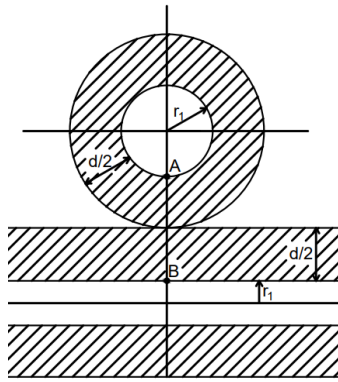


Рисунок 1

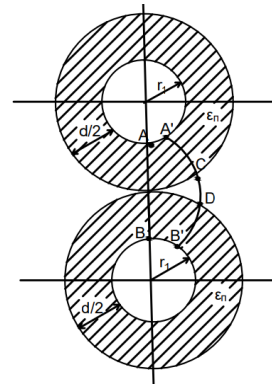


Рисунок 2

Для спрощення аналізу радіуси провідників (r_1) та товщину ізоляції $d/2$ на кожному з провідників було вибрано однаковими. Як в першому, так і в другому випадку, така конструкція не може бути розрахована опираючись тільки на допустиму робочу напруженість в твердому ізоляційному матеріалі, оскільки при цьому в місці дотику ізоляції двох провідників утворюється масляний простір, ширина якого стрімко зменшується до нуля в точці дотику.

Максимальна напруженість електричного поля в даних конструкціях буде виникати на поверхнях провідників у точках А (або В) на прямій, що з'єднує найкоротшим шляхом центри перерізів обох провідників.

Максимальну напруженість E_{max} у цьому випадку можна визначити за формулою [1].

$$E_{max} = \frac{U}{2r_1 \sqrt{\frac{S/2 - r_1}{S/2 + r_1} \operatorname{arch} \frac{S/2}{r_1}}} \quad (1)$$

де U – напруга між провідниками, r_1 – радіуси провідників, S – відстань між осями провідників.

Для інженерних розрахунків максимальну напруженість можна визначити по спрощеній формулі, якщо припустити, що поле між двома паралельними циліндрами (рис.2) можна замінити полем одного циліндра над площиною при зменшенні напруги в два рази, до $U/2$, та відстані між центром циліндра та площиною рівній $S/2$ (площина проходить в точці дотику циліндрів). В свою чергу тепер можна перейти від поля циліндра над площиною, до поля двох коаксиальних циліндрів з радіусами, відповідно r_1 та $(S/2 = r_1 + d/2)$. Виходячи з таких припущень максимальну напруженість на поверхні внутрішнього циліндра можемо визначити за відомою формулою для двох коаксиальних циліндрів:

$$E_{max} = \frac{U}{2r_1 \ln \frac{r_1 + d/2}{r_1}} \quad (2)$$

Для розрахунку максимальної робочої напруженості необхідно вибрати товщину твердої ізоляції на кожному з провідників. Якщо ізоляція виконана з просоченого маслом паперу, для якого допустима середня напруженість електричного поля $E_{\text{ср}}$, а різниця потенціалів між провідниками U , то товщина ізоляції на обох провідниках визначається як $d = E_{\text{ср}} / U$. Тобто товщина паперової ізоляції на кожному провіднику складе $d/2$.

Для визначення середньої напруженості у «масляному клині» (рис.2) розглянемо силову лінію АВ, яка з'єднує два провідника, та розділена маслом у точках С та D. Ця силова лінія розділена на три частини – АС – ділянка в твердій ізоляції першого провідника, DB - ділянка в твердій ізоляції другого провідника та ділянка CD – яка проходить у маслі.

Ділянки, які проходять у твердій ізоляції позначимо як товщину твердої ізоляції (папір) $l_{\text{п}} = (AC + DB)$, а ділянка $l_{\text{м}} = CD$ – довжина силової лінії, яка проходить у маслі.

Якщо середню напруженість електричного поля у твердій ізоляції позначити як $E_{\text{п}}$, а у маслі як $E_{\text{м}}$, і, відповідно, відносні діелектричні проникності $\epsilon_{\text{п}}$ та $\epsilon_{\text{м}}$, то

$$U = E_{\text{п}} \cdot l_{\text{п}} + E_{\text{м}} \cdot l_{\text{м}}$$

$$\text{Але, оскільки, } \frac{E_{\text{п}}}{E_{\text{м}}} = \frac{\epsilon_{\text{м}}}{\epsilon_{\text{п}}}, \text{ то } U = E_{\text{м}} \cdot \left(l_{\text{п}} \frac{\epsilon_{\text{м}}}{\epsilon_{\text{п}}} + l_{\text{м}} \right).$$

Звідси середня напруженість поля у «масляному клині»:

$$E_{\text{м}} = \frac{U}{l_{\text{м}} + l_{\text{п}} \frac{\epsilon_{\text{м}}}{\epsilon_{\text{п}}}} \quad (3)$$

У формулі (3) для різних силових ліній вираз $(l_{\text{п}} \epsilon_{\text{м}} / \epsilon_{\text{п}})$ залишається приблизно постійним, що дозволяє розрахувати залежність середньої напруженості у маслі $E_{\text{м}} = f(l_{\text{м}})$ при заданих значеннях напруги U та різних товщин ізоляції $l_{\text{п}}$ (тобто при заданих середніх напруженостях в паперовій ізоляції).

Розрахунки зроблені для трьох значень середньої напруженості електричного поля в папері, а саме, для 15 кВ/мм, 6 кВ/мм та 2 кВ/мм а їх результати представлені на рис.3.

Максимальні напруженості, розраховані для $U=100$ кВ по (1) та (2) при вибраних середніх напруженостях у папері 2 кВ/мм; 6 кВ/мм, 15 кВ/мм та розміри паперової ізоляції наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

$E_{\text{роб.п}}$ кВ/мм	$l_{\text{п}}$ мм	$E_{\text{мак}}$ за (2) кВ/мм	$E_{\text{мак}}$ за (1) кВ/мм
2	25	4,603	3,975
6	8,333	13,808	11,935
15	3,333	34,519	29,812

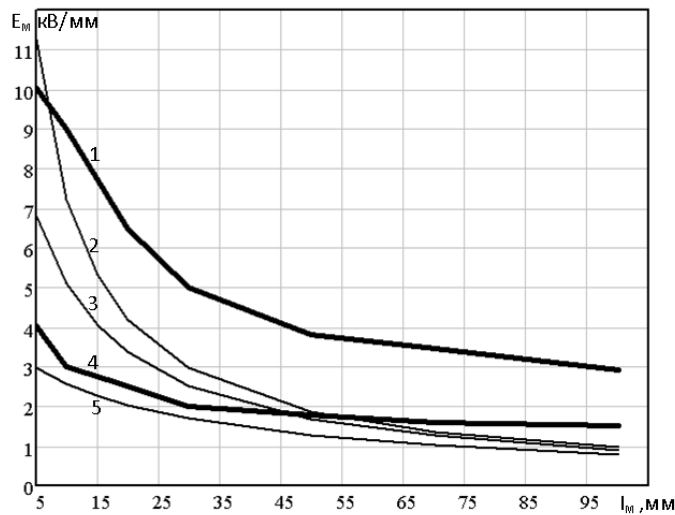


Рисунок 3 – Середня напруженість E_m в «масляному клині»
 1 – пробивна напруженість масла по [2]; 2 – середня напруженість у папері 15 кВ/мм; 3 – середня напруженість у папері 6 кВ/мм; 4 - пробивна напруженість масла по [3]; 5 - середня напруженість у папері 2 кВ/мм.

Висновки: На рис. 3 наведено залежності $E_m=f(l_m)$ для значень середніх робочих напруженостей у паперовій ізоляції E_p , рівних 15, 6 і 2 кВ/мм (криві 2,3 і 5). Пробивна напруженість масла за результатами досліджень з різних джерел наведена на рис.3 кривими 1 та 4. Аналізуючи графік, можна зробити висновок, що у разі, якщо електрична міцність масла відповідає кривій 4 [3], при середніх напруженостях у папері 15 кВ/мм та 6 кВ/мм (криві 2,3) масляний проміжок коротший ніж 50 мм буде мати недостатню електричну міцність та існує вірогідність, що на цьому відрізку буде виникати електричний розряд. Якщо електрична міцність масла буде вищою (відповідно, крива 1[2]) пробій масла буде відбуватись тільки при середній напруженості у папері 15 кВ/мм та на відстані до 8 мм від точки дотику. І тільки при середній напруженості у папері 2 кВ/мм пробій у «масляному клині» буде відсутній при заданих значеннях пробивних напруженостей масла (криві 1 та 4).

Таким чином, не зважаючи на високі допустимі напруженості у паперовій ізоляції, які дозволяють зменшувати товщину твердої ізоляції, з урахуванням можливості пробою «масляного клина», середню напруженість у паперовій ізоляції необхідно зменшувати що призводить до свідомого збільшення її товщини.

Перелік посилань

1. Изоляция установок высокого напряжения: Учеб.для вузов/Г.С.Кучинский, В.Е.Кизеветтер, Ю.С.Пинталь; Под общ. ред. Г. С. Кучинского. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 368 с.:
2. Электрофизические основы техники высоких напряжений: Учеб.для вузов/И.М.Бортник, И.П.Верещагин, Ю.Н.Вершинин и др.; Под ред. И.П.Вершинина, В.П.Ларионова. - М.:Энергоатомиздат, 1993. – 543с.
3. <https://www.ess-ltd.ru/elektro/proboi-dielektrikov.php>