

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання курсової роботи

з дисципліни «Техніка високих напруг»

для студентів спеціальності

141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ОС «бакалавр» денної та заочної форм навчання

УДК 621.3.048

Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Техніка високих напруг» на тему «Розрахунок високовольтного вводу з паперово-масляною ізоляцією конденсаторного типу» для студентів спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка ОС «бакалавр» денної та заочної форм навчання. М.М. Власенко – Луцьк: ДонНТУ, 2023. – 56 с.

Методичні вказівки містять теоретичні та практичні рекомендації з курсового проектування електричної ізоляції високовольтного вводу. У посібнику наводяться стислий опис конструкцій високовольтних вводів з різними видами внутрішньої ізоляції, наведена методика розрахунку ізоляційного остова з паперово-масляною ізоляцією конденсаторного типу за різними оптимізаційними умовами, приклади вибору та розрахунку фарфорових покришок, методика виконання розрахунків стійкості ізоляції вводу до теплового пробою.

Укладач: Микола Власенко, доц., к.т.н., доц. каф. ЕлІн

Рецензент: Сергій Тимошенко, доц., д.т.н., проф. каф. ЕлІн

Відповідальний за випуск: Олександр Колларов, доц., к.т.н., доц. каф. ЕлІн

Затверджено навчально-методичним відділом ДонНТУ,
протокол №____ від _____ 2023 р.

Розглянуто на засіданні кафедри електричної інженерії,
протокол № 13 від 2 жовтня 2023 р.

ДонНТУ, 2023 р.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВИСОКОВОЛЬТНІ ВВОДИ КОНДЕНСАТОРНОГО ТИПУ	5
2 ВИМОГИ ДО ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВВОДІВ	8
3 РОЗРАХУНОК ІЗОЛЯЦІЙНОГО ОСТОВА	12
3.1 Остов з постійною радіальною напруженістю електричного поля .	15
3.2 Остов з постійною аксіальною напруженістю електричного поля .	19
3.3 Остов з постійною товщиною прошарків і постійними уступами .	24
3.4 Розрахунок остова з урахуванням обмежень	29
4 РОЗРАХУНОК ФАРФОРОВОЇ ПОКРИШКИ	33
5 РОЗРАХУНОК СТІЙКОСТІ ОСТОВА ДО ТЕПЛОВОГО ПРОБОЮ	37
6 ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ, КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ І ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ	41
ДОДАТОК А	54
ДОДАТОК Б	55
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	56

ВСТУП

Основна роль ізоляторів високої напруги полягає в тому, щоб забезпечити належне кріплення лінійних провідників до заземлених опорних конструкцій. У цьому відношенні ізолятори відіграють дві важливі ролі:

1. Забезпечують електричну цілісність системи за різних погодних умов, постійних електричних напруг, пов'язаних з напругою в системі, а також відповідних тимчасових та комутаційних перенапруг. Оскільки загрози прямих ударів блискавки практично не можна усунути, то їх, безумовно, можна знизити до прийнятного рівня.

2. Підтримують механічну цілісність системи, витримуючи механічні навантаження, пов'язані з вагою провідника та пов'язаним із ним перенапруженням через обледеніння і вітрове навантаження.

З поступовим підвищенням напруги ЛЕП від 33 до 1100 кВ протягом ХХ століття, як електричні напруги, так і механічні навантаження від масивних пучків провідників представляють виклик для розробників ізоляторів. Цим вимогам мають відповідати лінії електропередач високої та надвисокої напруги з потужністю передачі електроенергії в тисячі МВт.

Високовольтні вводи є дуже важливими елементами трансформаторів, високовольтних апаратів, а також електроустаткування електростанцій і підстанцій. Вони являють собою складні електроізоляційні конструкції, що складаються із фарфорових покриттів, герметично з'єднаних одна з одною, усередині яких розташовується багатопочаткова ізоляція. Внутрішній простір вводитів заповнений вакуумованим ізоляційним маслом.

1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВИСОКОВОЛЬТНІ ВВОДИ КОНДЕНСАТОРНОГО ТИПУ

Високовольтні вводи належать до класу прохідних ізоляторів, призначення яких є подача високої напруги всередину металевих баків високовольтних силових трансформаторів, реакторів, вимикачів та іншого обладнання, а також для введення напруги всередину будівель та споруд підстанцій, розподільчих пристроїв закритого типу.

Вводи з паперово-масляною ізоляцією випускаються на напруги від 110 до 1150 кВ.

За видом зовнішньої ізоляції вводи поділяють на вводи з нормальною та підсиленою зовнішньою ізоляцією. В останньому випадку верхня покритка вводу має більш розвинену поверхню у виступаючих ребрах. При цьому значно зростає довжина шляху витoku струму по поверхні фарфорової покритки. Вводи з підсиленою зовнішньою ізоляцією використовуються в районах із забрудненою атмосферою.

За видом зовнішньої ізоляції вводи поділяються залежно від ступеня забруднення навколишнього середовища.

За видом внутрішньої ізоляції ВВ поділяють на вводи:

з паперово-масляною ізоляцією;

з твердою ізоляцією;

з маслобар'єрною ізоляцією;

з елегазовою ізоляцією.

Високовольтні вводи на напруги 35 кВ та вище виготовляються з внутрішньою ізоляцією конденсаторного типу. Залежно від конструкції внутрішньої ізоляції високовольтні вводи конденсаторного типу поділяють на маслобар'єрні, паперово-масляні та вводи з твердою (паперово-бакелітовою) ізоляцією.

Першими вводами конденсаторного типу були вводи з бакелітового паперу. Остов вводу з паперово-бакелітовою ізоляцією виготовляють

намотуванням лакованого з одного боку паперу товщиною 0,06 мм на струмоведучий мідний стрижень або струмоведучу трубу в гарячому стані при температурі $160 \div 185^{\circ}\text{C}$. У зв'язку з високою гігроскопічністю паперу паперово-бакелітові ізолятори здебільшого застосовують в обладнанні, розміщеному в приміщеннях. Якщо ізолятори такого типу планують використовувати для зовнішньої установки, то їх розміщують у фарфорових покришках, а простір між покришкою та ізоляційним остовом заливають спеціальною мастикою або ізоляційним маслом. Якщо нижня частина ізолятора працює в маслі (наприклад, коли ізолятор розміщений на кришці бака трансформатора, залитого ізоляційним маслом), то нижньої фарфорової покришки не передбачено. Конструкцію вводу на 35 кВ показано на рис. 1.1.

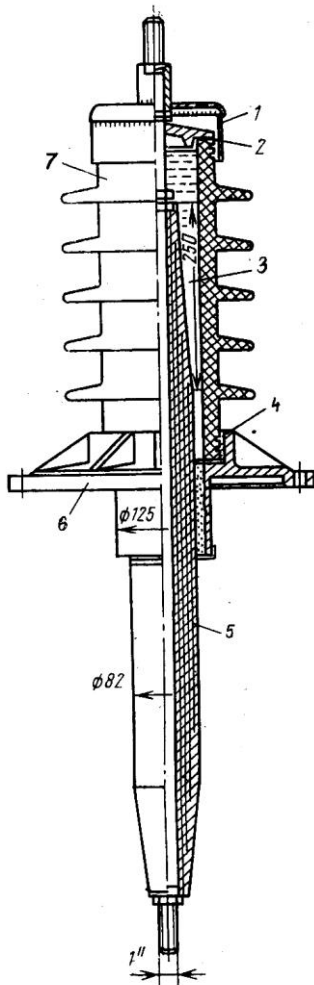


Рисунок 1.1 - Ввід на напругу 35 кВ для зовнішньої установки з паперово-бакелітовою ізоляцією:

1 - ковпак дощовий; 2 - чавунна заглушка; 3 - мастика;
4 – цементне кріплення; 5 – ізоляційний остов; 6 – опорний фланець; 7 - фарфорова покришка

Виготовляючи паперово-бакелітовий остов, товщину прошарку між конденсаторними обкладками беруть $2 \div 4$ мм. Кількість прошарків визначають розрахунком, що орієнтовно становить $6 \div 11$ при напрузі 35 кВ, $20 \div 30$ при 110

кВ і $30 \div 40$ при $150 \div 220$ кВ.

Конструкцію вводу з паперово-масляною ізоляцією показано на рис. 1.2. У верхній частині вводу до фланця на спеціальному піддоні кріпиться маслорозширювач 1, обладнаний показчиком рівня масла 2.

Для захисту масла від зволоження розширювач можна обладнувати гідравлічним затвором, який усуває контакт ізоляційного масла вводу з навколишнім середовищем. У затворі використовується трансформаторне масло, що не контактує з маслом вводу.

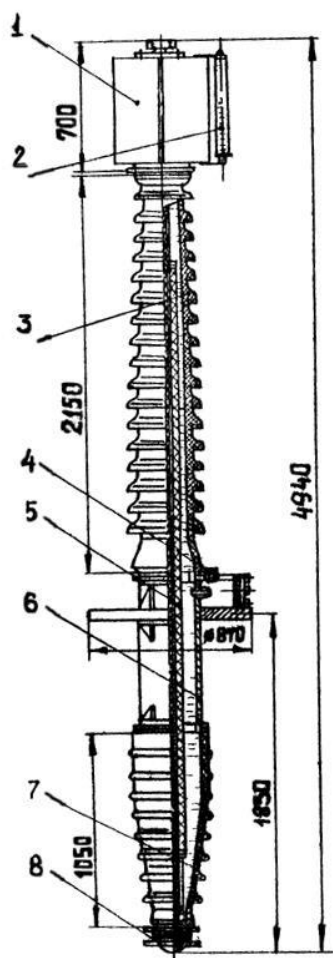


Рисунок 1.2 - Високовольтний ввід конденсаторного типу на напругу 220 кВ з паперово-масляною ізоляцією:

1 – кожух розширювача; 2 – показчик рівня масла; 3 – покриття верхня; 4 – вимірювальний вивід; 5 – осто́в ізоляційний; 6 – втулка з'єднувальна; 7 – покриття нижня; 8 – контактний наконечник

Високовольтний ввід у загальному випадку має такі конструктивні елементи [1,2]:

1) стрижень або трубу з червоної міді, що є струмоведучим провідником в апаратних і лінійних вводах. У трансформаторних вводах всередині труби проходить кабель від обмотки трансформатора, причому кабель припаяний до наконечника вводу;

2) верхню фарфорову покришку конічної або циліндричної форми з необхідною кількістю ребер, що забезпечують потрібне значення мокро-розрядної напруги;

3) маслорозширювач або бак тиску (компенсатор), призначений для компенсації змінювання об'єму масла у вводі при змінюванні значення струму і температури навколишнього середовища;

4) металеву з'єднувальну втулку, що служить для з'єднання верхньої і нижньої частини вводу. Втулка має фланець, за допомогою якого ввід кріпиться на кришці трансформаторів, вимикачів або на стінах будинків. На втулці розміщуються вимірювальні трансформатори струму;

5) нижню фарфорову покришку, що занурюється в масло і має меншу довжину і менш розвинуту поверхню, ніж верхня. Верхня і нижня покришки лінійних вводів можуть мати однакову довжину. Трансформаторні й апаратні вводи з паперово-бакелітовою ізоляцією можуть не мати нижньої покришки (див. рис. 1.1.). Нижня частина трансформаторного вводу закінчується металевим екраном, призначеним для вирівнювання електричного поля на краю вводу.

2 ВИМОГИ ДО ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВВОДІВ

Метою розрахунку високовольтних вводів є забезпечення їхньої надійної роботи за умови різних електричних впливів, що можуть виявлятися в процесі експлуатації.

Розміри і конструкцію ізоляційного остова високовольтного вводу конденсаторного типу потрібно вибирати таким чином, щоб була виключена можливість пробою в результаті тривалого існування іонізаційних процесів, що виникають під впливом електричного поля на поверхні або всередині ізоляції.

Для ретельно виготовленої паперово-масляної ізоляції конденсаторного типу робоча напруженість електричного поля E_p , тобто напруженість поля при

робочій (фазовій) напрузі, за умови відсутності початкової іонізації може бути [1]

$$E_p \leq 10,5 \cdot \delta^{-0,58} \text{ (кВ/см)}, \quad (2.1)$$

де δ - товщина шару ізоляції між двома вирівнювальними обкладками, см.

Напруженість поля за умови впливу випробувальної напруги $E_{\text{вип}}$ та відсутності критичної іонізації повинна становити

$$E_{\text{вип}} \leq 32 \cdot \delta^{-0,58} \text{ (кВ/см)}. \quad (2.2)$$

Формули (2.1) і (2.2) дозволяють визначити допустиме значення радіальної складової напруженості електричного поля в ізоляційному остові.

Розрядну напругу вздовж уступу між краями сусідніх вирівнювальних обкладок у маслі (нижня частина вводу) можна визначити за емпіричною формулою [3]

$$U_{\text{р.н.}} = 14 \sqrt{0,1 + \delta + 3,17 \lambda_{\text{н}} \sqrt{\delta}} \text{ (кВ)}, \quad (2.3)$$

де $\lambda_{\text{н}}$ – довжина уступу в нижній частині вводу, см.

Розраховуючи довжини уступів між кінцями сусідніх вирівнювальних обкладок, виходять з того, щоб розрядна напруга вздовж уступів по нижній частині вводу, розрахована за формулою (2.3), перевищувала його витримувану напругу в $1,3 \div 1,6$ рази.

Розмір довжини уступів в маслі вважається достатнім, якщо аксіальна напруженість $E_{\text{а.н.}}$ становить $(8,7 \div 10)$ кВ/см і не перевищує

$$E_{\text{а.н.}} = \frac{U}{\sum \lambda_{\text{н}}} < 12,5 \text{ кВ/см}, \quad (2.4)$$

де U – розрахункова напруга.

Довжини уступів у верхній частині вводу вибирають з умов координації зовнішньої ізоляції по повітряній і масляній частинах. Аксіальна розрядна напруженість уздовж поверхні діелектрика в повітрі приблизно в 2 рази менша від аксіальної розрядної напруженості в маслі. Тому довжину верхньої

фарфорової покритишки $l_{\text{в.п.}}$ і довжину нижньої фарфорової покритишки $l_{\text{н.п.}}$ вибирають так, щоб був взаємозв'язок

$$l_{\text{в.п.}} = \frac{2}{\alpha} l_{\text{н.п.}} \quad (2.5)$$

Значення коефіцієнта α беруть більшим за одиницю ($\alpha = 1,05 \div 1,1$), щоб у разі перенапруг перекриття верхньої покритишки, яка знаходиться у повітрі, було більш можливим, ніж перекриття нижньої покритишки, яка знаходиться в маслі.

Досвід конструювання показав, що довжини покритишок доцільно вибирати такими:

$$l_{\text{в.п.}} = 1,45 \sum \lambda_{\text{в}}; \quad l_{\text{н.п.}} = 1,2 \sum \lambda_{\text{н}}, \quad (2.6)$$

де $\sum \lambda_{\text{в}}$ і $\sum \lambda_{\text{н}}$ - суми довжин уступів у верхній і нижній частинах вводу.

Підставивши співвідношення (2.6) у (2.5) і вважаючи $\alpha = 1,1$, знаходимо

$$\sum \lambda_{\text{в}} = 1,5 \sum \lambda_{\text{н}} \quad (2.7)$$

Таким чином, довжини уступів у верхній повітряній частині остова доцільно вибирати в 1,5 рази більшими, ніж у нижній частині, що працює в маслі.

Якщо нижня частина вводу також працює в повітрі (лінійні вводи), то довжини уступів у верхній і нижній частинах вважають однаковими.

Сума довжин уступів у верхній частині остова вважається задовільною, якщо аксіальна напруженість $E_{\text{а.в.}}$ становить $4,8 \div 5,4$ кВ/см і не перевищує

$$E_{\text{а.в.}} = \frac{U}{\sum \lambda_{\text{в}}} < 5,5 \text{ кВ/см.} \quad (2.8)$$

Таким чином, до ізоляції високовольтних вводів конденсаторного типу висувають такі вимоги.

1. У країв вирівнювальних обкладок не повинно виникати ковзних розрядів при розрахунковій напрузі U , що дорівнює

$$U = 1,1 U_{\text{с.в.}} \quad (2.9)$$

де $U_{\text{с.в.}}$ – витримувана випробувальна напруга вводу в сухому стані в нормальних

атмосферних умовах (табл. 2.1); 1,1 – коефіцієнт, що враховує розкид напруги в межах $\pm 10\%$ у разі обмеження перенапруг, що впливають на ввід.

Явище нестійкої іонізації біля країв вирівнювальних обкладок вводів класів 110 кВ і вище, що працюють у мережах із заземленою нейтраллю, не повинне виникати у випадку найбільшої фазної напруги:

$$U_{\phi} = \frac{U_{н.р.}}{\sqrt{3}}, \quad (2.10)$$

де $U_{н.р.}$ – найбільша робоча лінійна напруга.

Якщо

$$\frac{U}{U_{с.р.}} > \frac{E_{виц}}{E_p}, \quad (2.11)$$

то визначальною є випробувальна напруга, тобто умова відсутності критичної іонізації при розрахунковій напрузі ($U_{с.р.}$ – розрядна напруга зовнішньої ізоляції у сухому стані). Зазвичай це має місце для вводів класів 220 кВ і нижчих.

Таблиця 2.1 - Нормовані випробувальні напруги для ізоляторів

Клас напруги, кВ	Найбільша робоча напруга $U_{н.р.}$, кВ	Випробувальна напруга при плавному підніманні	
		у сухому стані $U_{с.в.}$, кВ	під дощем, $U_{м.в.}$, кВ
110	126	295	215
120	137	317	235
130	149	338	254
140	160	357	273
150	172	375	290
160	183	400	310
170	195	425	329
180	206	450	349
190	218	475	368
200	229	500	388
210	241	525	407
220	252	550	425

2. Розрядну напругу вздовж уступів ізоляційного остова в маслі $U_{p.y.}$ визначають з умови

$$U_{p.y.} > (1,3 \div 1,6)U_{p.n.}, \quad (2.12)$$

де $1,3 \div 1,6$ – коефіцієнт запасу міцності щодо розрахункової напруги, що вводиться для усунення можливості перекриття остова.

3. Сухорозрядна $U_{c.p.}$ і мокрозрядна $U_{m.p.}$ напруги зовнішньої ізоляції повинні відповідати умовам:

$$U_{c.p.} > U_{c.b.}; \quad U_{m.p.} > U_{m.b.} \quad (2.13)$$

де $U_{c.b.}$ і $U_{m.b.}$ – випробувальна напруга ізолятора у сухому стані і під дощем (табл. 2.1).

4. Теплового ушкодження ізоляції (пробою) не повинно бути за умови тривалого впливу робочої напруги.

3 РОЗРАХУНОК ІЗОЛЯЦІЙНОГО ОСТОВА

Коаксіальні конденсаторні (вирівнювальні) обкладки вводу розташовані на відстані $1 \div 5$ мм одна від одної. Тому електричне поле між двома конденсаторними обкладками в їхній середній частині має тільки радіальну складову E_r і являє собою поле циліндричного конденсатора, напруженість якого

$$E_r = \frac{Q}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r l}, \quad (3.1)$$

де Q - заряд на електродах; r – радіус; l – довжина обкладки.

Якщо знехтувати силовими лініями електричного поля, що виходять за межі вирівнювальних обкладок ізоляційного остова, то потік вектора електричного зсуву всередині остова можна вважати постійним. Це приводить до рівності

$$E_r r l = \Phi = \text{const.} \quad (3.2)$$

На внутрішній поверхні вирівнювальної обкладки заряд розподілений по

всій довжині, а на зовнішній поверхні – тільки по тій частині довжини, що охоплюється верхньою вирівнювальною обкладкою меншої довжини. Внаслідок цього густина зарядів на зовнішній поверхні вирівнювальної обкладки більша, ніж на внутрішній поверхні, і з переходом з внутрішньої поверхні на зовнішню стрибкоподібно збільшується напруженість електричного поля (див. рис. 3.1).

Різницю довжин двох сусідніх вирівнювальних обкладок Δl називають також сумарним уступом. Сумарний уступ складається з уступу у верхній частині й уступу в нижній частині остова:

$$\lambda = \Delta l = \lambda_{\text{в}} + \lambda_{\text{н}}. \quad (3.3)$$

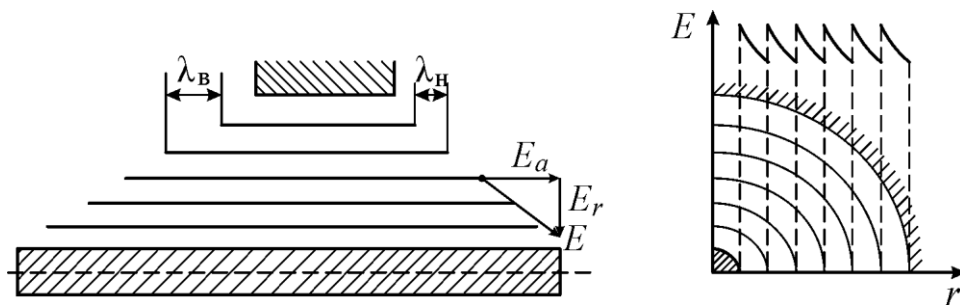


Рисунок 3.1 - Схема прохідного ізолятора конденсаторного типу та картина розподілу електричного поля.

Якщо напруга між сусідніми обкладками дорівнює ΔU , а відстань між ними Δr , то внаслідок малості Δr можна вважати, що радіальна складова напруженості електричного поля

$$E_r = \frac{\Delta U}{\Delta r}. \quad (3.4)$$

Аксіальні складові напруженості електричного поля між краями двох сусідніх обкладок у верхній і нижній частинах вводу відповідно дорівнюють:

$$E_{\text{а.в.}} = \frac{\Delta U}{\lambda_{\text{в}}}; \quad E_{\text{а.н.}} = \frac{\Delta U}{\lambda_{\text{н}}}. \quad (3.5)$$

Для зручності розрахунків вводять також умовну, зведену до сумарного уступу, розрахункову аксіальну складову електричного поля

$$E_a = \frac{\Delta U}{\lambda_b + \lambda_n} = \frac{\Delta U}{\Delta l}. \quad (3.6)$$

Можна переконатися, що розрахункова аксіальна складова пов'язана з фактичною аксіальною складовою поля у верхній і нижній частинах вводу співвідношенням

$$\frac{1}{E_a} = \frac{1}{E_b} + \frac{1}{E_n}. \quad (3.7)$$

Об'єднавши вирази (3.4) і (3.6) і переходячи до нескінченно малих збільшень, можна записати

$$\frac{E_a}{E_r} = -\frac{\Delta r}{\Delta l} = -\frac{dr}{dl}. \quad (3.8)$$

Знак мінус у рівнянні (3.8) вказує на зменшення довжини обкладки на розмір Δl зі збільшенням радіуса на Δr .

Можна виділити три типи конструктивного виконання ізоляційного остова:

- з постійною радіальною складовою електричного поля $E_r = \text{const}$;
- з постійною аксіальною складовою електричного поля $E_a = \text{const}$;
- з постійною товщиною прошарків і постійними уступами $dr/dl = \text{const}$.

Диференціальне рівняння (3.8) дозволяє визначити залежність довжин обкладок від їхнього радіуса $l = f(r)$ для кожного із зазначених типів остова.

Сконструйований оптимально ізоляційний остов має забезпечувати:

- максимально можливе вирівнювання електричного поля;
- мінімальну витрату матеріалу на виготовлення остова.

У більшості випадків не вдається забезпечити сталість радіальної складової поля у всіх точках остова. Повніше використання ізоляції можливе, якщо радіальні напруженості біля струмоведучого стрижня і біля фланця будуть однаковими. Відповідно до рівняння (3.2) це можна забезпечити, якщо

$$r_n l_n = r_0 l_0 = \frac{\Phi}{E_r} = \text{const}, \quad (3.9)$$

де r_0 і l_0 – радіус і довжина так званої “нульової” обкладки, розміщеної найближче до стрижня; роль цієї обкладки може виконувати струмоведучий стрижень (труба); r_n і l_n – радіус і довжина останньої, заземленої обкладки поблизу фланця.

Позначимо:

$$\frac{r_n}{r_0} = \frac{l_0}{l_n} = \xi. \quad (3.10)$$

Варіюючи параметр ξ , можна домогтися зниження напруженості електричного поля і забезпечити мінімальну витрату матеріалу на виготовлення остова:

$$V = \pi(r_n^2 - r_0^2)l_0 = \min. \quad (3.11)$$

3.1 Остов з постійною радіальною напруженістю електричного поля

Якщо радіальна складової напруженості електричного поля в ізоляційному остові однакова ($E_r = \text{const}$), то це дозволяє найефективніше використовувати ізоляцію в радіальному напрямі й одержати мінімальний діаметр вводу.

Якщо $E_r = \text{const}$, то за рівнянням (3.2) отримаємо

$$rl = r_0l_0 = r_nl_n = C = \text{const}. \quad (3.12)$$

З виразу (3.12) випливає (якщо $l=C/r$)

$$\frac{dl}{dr} = -\frac{r_nl_n}{r^2}. \quad (3.13)$$

Підставляючи рівняння (3.13) у вираз (3.6), маємо

$$E_a = E_r \frac{r^2}{r_0l_0} = E_r \frac{r^2}{r_nl_n}, \quad (3.14)$$

Із формули (3.14) очевидно, що аксіальна напруженість електричного поля зростає пропорційно квадрату радіуса і має найбільше значення в останній

обкладці. Це приводить до збільшення довжини уступів між обкладками і довжини вводу.

Оскільки припустима радіальна напруженість електричного поля відповідно до (2.1) – (2.5) залежить від товщини прошарку, доцільно при $E_r = \text{const}$ вважати постійною товщину прошарку ($\delta = \text{const}$). Тоді кількість прошарків визначають простим співвідношенням

$$n = \frac{U}{E_{r\max} \delta}, \quad (3.15)$$

де $E_{r\max}$ – допустима радіальна напруженість поля, зведена до розрахункової напруги і $E_{r\max}$ може бути визначена із таких співвідношень:

$$E_{r\max} = E_p \frac{U}{U_\phi} \quad \text{або} \quad E_{r\max} = E_{\text{вип}}, \quad (3.16)$$

де E_p та $E_{\text{вип}}$ – визначають відповідно за (2.1) та (2.2).

З двох отриманих значень $E_{r\max}$ беруть менше, а напруга дорівнює розрахунковій напрузі U (див. формулу (2.12)). U_ϕ визначають по (2.13).

Відповідно до рівняння (3.14) найбільша аксіальна напруженість поблизу фланця

$$E_{a\max} = E_{r\max} \left(\frac{r_n}{l_n} \right), \quad (3.17)$$

а найменша – поблизу стрижня

$$E_{a\min} = E_{r\max} \frac{r_0^2}{r_n l_n}. \quad (3.18)$$

Відношення найбільшої аксіальної напруженості до найменшої згідно із формулами (3.17) і (3.18) та з урахуванням (3.10) дорівнює:

$$\frac{E_{a\max}}{E_{a\min}} = \frac{r_n^2}{r_0^2} = \xi^2. \quad (3.19)$$

Отже, для зменшення неоднорідності аксіальної складової напруженості електричного поля необхідно зменшувати параметр ξ .

Радіус останньої обкладки r_n пов'язаний з радіусом нульової обкладки r_0 співвідношенням, що випливає з (3.15):

$$r_n = r_0 + n\delta = r_0 + \frac{U}{E_{r\max}}. \quad (3.20)$$

При цьому

$$\xi = \frac{r_n}{r_0} = 1 + \frac{U}{r_0 E_{r\max}}. \quad (3.21)$$

З рівняння (3.21) випливає, що для зменшення параметра ξ і вирівнювання електричного поля в аксіальному напрямі потрібно збільшувати радіус нульової обкладки.

Збільшення радіуса нульової обкладки r_0 доцільне, якщо це не призводить до збільшення витрати матеріалу. Відповідно до формул (3.11) і (3.20) об'єм матеріалу

$$V = \pi \left[\left(r_0 + \frac{U}{E_{r\max}} \right)^2 - r_0^2 \right] l_0 = \pi \left(\frac{2U}{E_{r\max}} r_0 + \frac{U^2}{E_{r\max}^2} \right) l_0. \quad (3.22)$$

Для конструювання введів звичайно заданою є довжина останньої обкладки l_n . Величину l_0 , що входить в (3.22), можна виразити через l_n і r_0 , використовуючи рівняння (3.9) і (3.20):

$$l_0 = \frac{l_n r_n}{r_0} = \frac{l_n}{r_0} \left(r_0 + \frac{U}{E_{r\max}} \right) = l_n \left(1 + \frac{U}{r_0 E_{r\max}} \right). \quad (3.23)$$

Тоді формула (3.22) набуде вигляду

$$V = \pi l_n \left(1 + \frac{U}{r_0 E_{r\max}} \right) \cdot \frac{U}{E_{r\max}} \left(2r_0 + \frac{U}{E_{r\max}} \right) = \frac{\pi l_n U}{E_{r\max}} \left(2r_0 + 3 \frac{U}{E_{r\max}} + \frac{U}{r_0 E_{r\max}^2} \right). \quad (3.24)$$

Визначимо радіус r_0 , за якого об'єм матеріалу є мінімальним, виходячи з умови

$$\begin{aligned}\frac{dV}{dr_0} &= 0; \\ \frac{dV}{dr_0} &= \frac{\pi l_n U}{E_{r \max}} \left(2 - \frac{U^2}{r_0^2 E_{r \max}^2} \right) = 0,\end{aligned}\tag{3.25}$$

звідки

$$r_0 = \frac{U}{\sqrt{2} E_{r \max}} = 0,71 \frac{U}{E_{r \max}}.\tag{3.26}$$

Підставивши (3.26) у (3.21), отримаємо:

$$\xi = 1 + \sqrt{2} = 2,41,\tag{3.27}$$

$$r_n = 2,41 r_0 = 1,71 \frac{U}{E_{r \max}}.\tag{3.28}$$

Оскільки довжину останньої обкладки l_n задано, довжину нульової обкладки можна знайти таким чином:

$$l_0 = 2,41 l_n.\tag{3.29}$$

Якщо довжину останньої обкладки не задано, то її доцільно визначати із формули (3.17), тобто, виходячи з умови, що поблизу фланця аксіальна напруженість дорівнює допустимій:

$$l_n = r_n \frac{E_{r \max}}{E_{a \max}} = 1,71 \frac{U}{E_{a \max}},\tag{3.30}$$

при цьому

$$l_0 = 4,12 \frac{U}{E_{a \max}}.$$

Потрібно звернути увагу на те, що розмір l_n не може бути меншим, ніж розрахований за формулою (3.30), інакше аксіальна напруженість буде перевищувати допустиму величину.

Формули (3.26) - (3.30) дозволяють розраховувати оптимальні розміри остова з постійною радіальною напруженістю електричного поля і постійною товщиною прошарків. Радіус i -ї обкладки

$$r_i = r_{i-1} + \delta, \quad (3.31)$$

де r_{i-1} - радіус попередньої обкладки.

Довжина i -ї обкладки

$$l_i = \frac{r_n l_n}{r_i}. \quad (3.32)$$

3.2 Остов з постійною аксіальною напруженістю електричного поля

Якщо аксіальна складова напруженості електричного поля в остові постійна ($E_a = \text{const}$), то це дозволяє найефективніше використовувати ізоляцію в аксіальному напрямі й одержати мінімальну довжину ізолятора.

Визначивши E_r із рівняння (3.8) і підставивши в (3.2), можна одержати:

$$rl \frac{dl}{dr} = -\frac{\Phi}{E_a} = \text{const}. \quad (3.33)$$

Розділяючи змінні

$$l \cdot dl = K_1 \frac{dr}{r} \quad (3.34)$$

та інтегруючи праву і ліву частини, знаходимо

$$\frac{l^2}{2} = K_1 \ln r + K_2. \quad (3.35)$$

Постійні K_1 і K_2 знаходимо з граничних умов:

$$r = r_n \text{ при } l = l_n; \quad r = r_0 \text{ при } l = l_0. \quad (3.36)$$

Підставляючи вираз (3.36) у (3.35), одержуємо систему двох алгебричних рівнянь із двома невідомими:

$$\begin{aligned} K_1 \ln r_n + K_2 &= \frac{l_n^2}{2}; \\ K_1 \ln r_0 + K_2 &= \frac{l_0^2}{2}. \end{aligned} \quad (3.37)$$

Вирахувавши з першого рівняння системи друге, знаходимо

$$K_1 = \frac{l_n^2 - l_0^2}{2 \ln \frac{r_n}{r_0}}. \quad (3.38)$$

Підставляючи вираз (3.38) в друге рівняння, маємо

$$K_2 = \frac{l_0^2}{2} - \frac{(l_n^2 - l_0^2) l_n r_0}{2 \ln \frac{r_n}{r_0}}. \quad (3.39)$$

Ураховуючи одержані значення постійних K_1 і K_2 , розв'язок диференційного рівняння (3.35) записуємо в такий спосіб:

$$\frac{l^2}{2} = \frac{l_n^2 - l_0^2}{2} \cdot \frac{\ln r}{\ln \frac{r_n}{r_0}} + \frac{l_0^2}{2} - \frac{l_n^2 - l_0^2}{2} \cdot \frac{\ln r_0}{\ln \frac{r_n}{r_0}},$$

і остаточно

$$\frac{l_0^2 - l^2}{l_0^2 - l_n^2} = \frac{\ln \frac{r}{r_0}}{\ln \frac{r_n}{r_0}}. \quad (3.40)$$

Отримане рівняння (3.40) зв'язує розміри r і l та являє собою рівняння обвідної лінії, яка проходить по верхніх кінцівках обкладок. Із цього рівняння можна визначити похідну $\frac{dr}{dl}$, що при підстановці в (3.8) дозволить визначити радіальну складову поля в різних точках остова. Для цього запишемо рівняння (3.40) так

$$\frac{l^2}{l_n^2 - l_0^2} - \frac{l_0^2}{l_n^2 - l_0^2} = \frac{\ln r}{\ln \frac{r_n}{r_0}} - \frac{\ln r_0}{\ln \frac{r_n}{r_0}}.$$

і продиференціюємо його за r та l :

$$\frac{2l \cdot dl}{l_n^2 - l_0^2} = \frac{\frac{dr}{r}}{\ln \frac{r_n}{r_0}}.$$

Звідси

$$\frac{dl}{dr} = \frac{l_n^2 - l_0^2}{2lr \ln \frac{r_n}{r_0}}. \quad (3.41)$$

Підставляючи отриману похідну в (3.8) і з урахуванням того, що

$$E_a = \frac{U}{l_0 - l_n} = \text{const}, \quad (3.42)$$

знаходимо радіальну складову поля

$$E_r = \frac{U}{l_0 - l_n} \cdot \frac{l_0^2 - l_n^2}{2lr \ln \frac{r_n}{r_0}},$$

або

$$E_r = \frac{U}{2lr} \cdot \frac{l_0 + l_n}{\ln \frac{r_n}{r_0}}. \quad (3.43)$$

Довжина обкладки l , яка входить в цей вираз, зв'язана з радіусом обкладки r співвідношенням, що випливає з виразу (3.40):

$$l = \sqrt{l_0^2 - \frac{(l_0^2 - l_n^2) \ln \frac{r}{r_0}}{\ln \frac{r_n}{r_0}}}. \quad (3.44)$$

Оскільки із збільшенням r розмір l згідно з (3.44) зменшується, залежність $E_r = f(r)$ має екстремум [1]. Графік цієї залежності показано на рис. 3.2. Очевидно, що оптимальним буде розподіл, при якому напруженості біля фланця і стрижня будуть однаковими (крива 1). У середній частині ізоляційного остова радіальна складового поля має мінімум і досягає найбільших значень у прошарках біля стрижня та фланця. Максимальна напруженість поля відповідно до (3.43) і (3.10)

$$E_{r_{\max}} = \frac{U(l_0 + l_n)}{2l_n r_n \ln \frac{r_n}{r_0}} = \frac{U}{2r_n} \cdot \frac{(\xi + 1)}{\ln \xi} = \frac{U}{2r_0} \cdot \frac{(\xi + 1)}{\xi \ln \xi}. \quad (3.45)$$

Як видно з виразу (3.45) $E_{r_{\max}}$ має складну залежність від параметра ξ і при визначеному параметрі ξ_0 буде мати найменше значення. Проведемо дослідження залежності (3.45) на екстремум, враховуючи, що $r_n = \text{const}$:

$$\frac{dE_{r\max}}{d\xi} = \frac{U}{2r_n} \cdot \left[\frac{\left(\ln \xi - (\xi + 1) \cdot \frac{1}{\xi} \right)}{(\ln \xi)^2} \right] = 0, \quad (3.46)$$

звідки

$$\ln \xi_0 - 1 - \frac{1}{\xi_0} = 0. \quad (3.47)$$

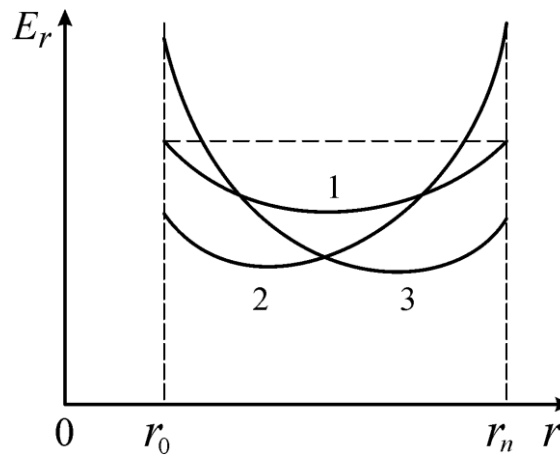


Рисунок 3.2 - Розподіл радіальної складової напруженості електричного поля в остові

Із формули (3.47) можна знайти

$$\xi_0 = 3,6 \quad (3.48)$$

За такого значення ξ_0 відношення $E_{r\max}$ поблизу стрижня і фланця та мінімальної напруженості в тілі остова, як показує розрахунок, буде дорівнювати 1,5. Відповідно до виразу (3.10), довжина заземленої обкладки поблизу фланця

$$l_n = \frac{l_0}{3,6}. \quad (3.49)$$

Проте за такої довжини заземленої обкладки збільшується витрата матеріалів порівняно з тим, що можна одержати, якщо виходити з умови мінімального розміру остова. Проведені дослідження показали, що витрати матеріалів для виготовлення остова будуть мінімальними за умови

$$\xi = 4,1. \quad (3.50)$$

Збільшення ξ від 3,6 до 4,1, як показують розрахунки, підвищує радіальну напруженість поля не більше ніж на 1%, але забезпечує значну економію матеріалу.

Згідно з рівняннями (3.45) і (3.50) оптимальні розміри остова вводу такі:

$$r_n = \frac{U(\xi + 1)}{2E_{r \max} \ln \xi} = \frac{1,8U}{E_{r \max}}; \quad (3.51)$$

$$r_0 = \frac{r_n}{\xi} = 0,438 \frac{U}{E_{r \max}}. \quad (3.52)$$

Якщо довжину останньої обкладки l_n не задано, то її оптимальний розмір можна визначити за формулою, що випливає з рівнянь (3.42) і (3.50) за умови, що поблизу фланця аксіальна напруженість поля дорівнює максимально допустимій величині:

$$l_n = \frac{U}{E_{a \max} \left(\frac{l_0 - l_n}{l_n} \right)} = \frac{U}{E_{a \max} (\xi - 1)} = 0,32 \frac{U}{E_{a \max}}. \quad (3.53)$$

Якщо розмір l_n задано, то вона має бути не меншою від розрахованої за формулою (3.53).

Розмір нульової обкладки

$$l_0 = \xi l_n = 4,1 l_n = 1,32 \frac{U}{E_{a \max}}. \quad (3.54)$$

Формули (3.51) і (3.54) дозволяють розрахувати оптимальні розміри остова з постійною аксіальною напруженістю електричного поля.

Виготовляючи вводи, довжину уступів здебільшого беруть постійною [5].

Для виконання умови сталості аксіальної складової поля потрібно забезпечити однакову різницю потенціалів на кожному прошарку ізоляції. Це, у свою чергу, приводить до вимоги рівності ємностей прошарків.

Такий остов можна виконати тільки за умови змінної товщини прошарків діелектрика між обкладками. Оскільки радіальна напруженість поля мінімальна всередині остова (рис. 3.2), а різниця потенціалів між обкладками однакова, то товщина прошарків повинна бути найбільша всередині остова і найменша – біля

стрижня та фланця.

Знаючи мінімально допустиму товщину прошарку ізоляції фланця і стрижня $\delta_{\min}$, а також допустимі напруженості поля $E_{r\max}$ і $E_{a\max}$, довжину уступу знаходимо за формулою, що випливає з (3.8) при $\Delta r = \delta_{\min}$:

$$\Delta l = \delta_{\min} \frac{E_{r\max}}{E_{a\max}} = \text{const.} \quad (3.55)$$

Тоді кількість прошарків з урахуванням (3.42) - (3.55)

$$n = \frac{l_0 - l_n}{\Delta l} = \frac{UE_{a\max}}{E_{a\max}\delta_{\min}E_{r\max}} = \frac{U}{\delta E_{r\max}}. \quad (3.56)$$

Довжину i -ї обкладки легко знайти, використовуючи розмір l_0 або l_n , а також Δl :

$$l_i = l_{i-1} - \Delta l$$

або

$$l_i = l_{i+1} + \Delta l. \quad (3.57)$$

Тут $l_{i-1} = l_0$ при $i = 1$, або $l_{i+1} = l_n$ при $i = n-1$.

Радіус i -ї обкладки можна знайти, використовуючи співвідношення (3.40):

$$\ln \frac{r_i}{r_0} = (l_0^2 - l_i^2) \frac{\ln \frac{r_n}{r_0}}{l_0^2 - l_n^2}. \quad (3.58)$$

Проте на практиці простіше скористатися співвідношенням (3.41):

$$\Delta r_i = \frac{2 \ln \frac{r_n}{r_0} \Delta l}{l_0^2 - l_n^2} r_i l_i; \quad (3.59)$$

$$r_{i+1} = r_i + \Delta r_i \quad \text{або} \quad r_i = r_{i-1} + \Delta r_i \quad (3.60)$$

3.3 Остов з постійною товщиною прошарків і постійними уступами

З технологічної точки зору зручніше виконувати ізоляційний остов з постійною довжиною уступів та постійною товщиною прошарків:

$$\Delta l = \text{const}; \quad \delta = \text{const}. \quad (3.61)$$

Оскільки $\delta = \Delta r$, то з (3.62) отримуємо:

$$\frac{dl}{dr} = \text{const}; \quad \frac{E_r}{E_a} = \text{const}. \quad (3.62)$$

Інтегруючи першу рівність (3.62), знаходимо

$$l = A_1 r + A_2, \quad (3.63)$$

де постійні A_1 і A_2 визначаються з граничних умов (3.36):

$$\begin{aligned} A_1 r_n + A_2 &= l_n; \\ A_1 r_0 + A_2 &= l_0. \end{aligned} \quad (3.64)$$

Звідси

$$A_1 = \frac{l_0 - l_n}{r_0 - r_n}; \quad (3.65)$$

$$A_2 = l_0 - \frac{(l_0 - l_n)r_0}{r_0 - r_n}. \quad (3.66)$$

Підставляючи значення постійних у (3.63), знаходимо рівняння обвідних кінців обкладок:

$$l = \frac{(l_0 - l_n)(r - r_0)}{r_0 - r_n} + l_0 \quad (3.67)$$

або

$$\frac{l_0 - l}{l_0 - l_n} = \frac{r - r_0}{r_0 - r_n}. \quad (3.68)$$

Диференціюючи (3.67), отримуємо

$$\frac{dl}{dr} = \frac{l_0 - l_n}{r_0 - r_n}. \quad (3.69)$$

Підставляємо вираз (3.69) у рівняння (3.8):

$$E_r = E_a \frac{l_0 - l_n}{r_n - r_0} = E_a \frac{\ln(\xi - 1)}{r_0(\xi - 1)}. \quad (3.70)$$

Таким чином, радіальна й аксіальна складові поля між собою пропорційні, але не є постійними величинами. Рівність (3.70) можна записати в такий спосіб:

$$E_r = E_a \frac{n\Delta l}{n\delta} = E_a \frac{\Delta l}{\delta}. \quad (3.71)$$

Оскільки товщину прошарку зазвичай задано ($\delta = \delta_{\max}$), то оптимальну довжину уступу можна визначити за формулою (3.55), що збігається з (3.71) при $E_a = E_{\max}$ і $E_r = E_{r\max}$.

Визначимо закон змінювання E_a й E_r в ізоляційному остові. Для цього, підставивши значення l за (3.67) у (3.2), отримаємо

$$E_r = \frac{\Phi}{rl} = \frac{\Phi}{r \left[l_0 + \frac{l_0 - l_n}{r_0 - r_n} (r - r_0) \right]}. \quad (3.72)$$

Для визначення величини Φ зробимо такі перетворення. Прикладену до вводу напругу знаходимо таким чином:

$$U = \int_{r_0}^{r_n} E_r dr = \int_{r_0}^{r_n} \frac{\Phi dr}{r \left(l_0 + \frac{l_0 - l_n}{r_0 - r_n} (r - r_0) \right)} = \int_{r_0}^{r_n} \frac{\Phi dr}{r(ar + b)}. \quad (3.73)$$

де

$$a = \frac{l_0 - l_n}{r_0 - r_n}; \quad b = l_0 - r_0 \frac{l_0 - l_n}{r_0 - r_n}. \quad (3.74)$$

Використовуючи табличний інтеграл

$$\int \frac{dx}{x(ax + b)} = -\frac{1}{b} \ln \left(\frac{ax + b}{x} \right),$$

можна одержати замість (3.73) у границях змінювання r від r_0 до r_n :

$$U = -\frac{\Phi}{l_0 r_0 \frac{l_0 - l_n}{r_0 - r_n}} \cdot \ln \left(\frac{l_0 + (r + r_0) \frac{l_0 - l_n}{r_0 - r_n}}{r} \right) \Bigg|_{r_0}^{r_n} = \frac{\Phi(r_0 - r_n)}{l_0 r_n - r_0 l_n} \ln \frac{l_n r}{l_0 r_n}. \quad (3.75)$$

Звідси, вводячи параметр $\xi = \frac{l_0}{l_n} = \frac{r_n}{r_0}$,

$$U = -\frac{\Phi r_0 (1-\xi)}{r_0 l_n (\xi^2 - 1)} \ln \xi^2 = \frac{2\Phi}{l_n (\xi + 1)} \ln \xi = \frac{2\Phi}{l_0 + l_n} \ln \frac{r_n}{r_0}. \quad (3.76)$$

Визначивши звідси постійну Φ і підставивши її в (3.72), одержимо

$$E_r = \frac{U(l_0 + l_n)}{2rl \ln \frac{r_n}{r_0}}, \quad (3.77)$$

що збігається з (3.43). Отже, для розглянутого типу остова також слушна формула (3.45), що випливає з (3.43).

Таким чином, в обох розглянутих випадках за постійної ємності шарів ($E_a = \text{const}$) і постійною товщиною шарів та довжиною уступів максимальна напруженість поля біля стрижня та фланця описується однією і тією самою формулою (3.45) і має однакову величину. Однак аксіальні напруженості за умови постійних товщин шарів і уступів, як видно з (3.70), розподіляються по товщині остова з такою ж нерівномірністю, як і радіальні напруженості, що неминуче приводить до збільшення аксіальних розмірів ізолятора. Тому **найбільш раціональною й оптимальною, з погляду використання ізоляції, є конструкція остова з постійною аксіальною складовою напруженості поля.**

З формули (3.77) випливає, що мінімальне значення напруженості поля поблизу нульової і останньої обкладок, як і раніше, досягається, якщо $\xi = 3,6$. Однак розрахунки показують, що мінімальна витрата матеріалу забезпечується за умови $\xi_0 = 3,2$. Тому беремо $\xi_0 = 3,2$.

Тоді згідно з рівнянням (3.45) оптимальні радіуси дорівнюють:

$$r_n = \frac{U}{2E_{r\max}} \cdot \frac{\xi + 1}{\ln \xi} = \frac{U}{2E_{r\max}} \cdot \frac{4,2}{1,16} = 1,81 \frac{U}{2E_{r\max}}; \quad (3.78)$$

$$r_0 = \frac{r_n}{3,2} = 0,565 \frac{U}{E_r}. \quad (3.79)$$

Якщо довжину останньої обкладки не задано, то оптимальну довжину можна визначити, використовуючи (3.70) і враховуючи, що $E_a = E_{a\max}$ при $E_r = E_{r\max}$:

$$l_n = r_0 \frac{E_{r \max}}{E_{a \max}} = 0,565 \frac{U}{E_{a \max}}. \quad (3.80)$$

Тоді оптимальна довжина нульової обкладки

$$l_0 = 3,2l_n = 1,81 \frac{U}{E_{a \max}}. \quad (3.81)$$

Кількість шарів

$$n = \frac{r_n - r_0}{\delta} = (1,81 - 0,565) \frac{U}{\delta E_{r \max}} = \frac{1,245U}{\delta E_{r \max}}. \quad (3.82)$$

Довжину і радіус i -ї обкладки визначають простими співвідношеннями:

$$l_i = l_{i-1} - \Delta l; \quad (3.83)$$

$$r_i = r_{i-1} + \delta \quad (3.84)$$

або

$$l_i = l_{i+1} + \Delta l; \quad (3.85)$$

$$r_i = r_{i+1} - \delta. \quad (3.86)$$

Ємність між сусідніми обкладками

$$C_i = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l_i}{\ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}. \quad (3.87)$$

В ізоляційному остові з постійними уступами і постійною товщиною шарів ємності шарів різні. Їх можна визначити за формулою (3.87).

Спад напруги на i -му прошарку

$$\Delta U_i = \frac{UC_{\text{екв}}}{C_i}, \quad (3.88)$$

де $C_{\text{екв}}$ – еквівалентна ємність остова;

$$C_{\text{екв}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}}. \quad (3.89)$$

3.4 Розрахунок остова з урахуванням обмежень

Вище розглянуто три варіанти виконання ізоляційного остова:

- 1) з постійною радіальною складовою напруженості електричного поля і постійною товщиною шарів;
- 2) з постійною аксіальною складовою поля і постійними уступами;
- 3) з постійною товщиною шарів і постійними уступами.

Якщо немає ніяких додаткових обмежень, то кожний з варіантів має свої оптимальні параметри, що зв'язані між собою таким чином:

$$l_0^{(1)} : l_0^{(2)} : l_0^{(3)} = 4,12 : 1,32 : 1,81 = 3,12 : 1,0 : 1,37; \quad (3.90)$$

$$l_n^{(1)} : l_n^{(2)} : l_n^{(3)} = 1,71 : 0,32 : 0,565 = 5,35 : 1,0 : 1,77; \quad (3.91)$$

$$r_0^{(1)} : r_0^{(2)} : r_0^{(3)} = 0,71 : 0,438 : 0,565 = 1,62 : 1,0 : 1,29; \quad (3.92)$$

$$r_n^{(1)} : r_n^{(2)} : r_n^{(3)} = 1,71 : 1,8 : 1,81 = 1,0 : 1,05 : 1,06; \quad (3.93)$$

$$n^{(1)} : n^{(2)} : n^{(3)} = 1,0 : 1,0 : 1,245; \quad (3.94)$$

$$V^{(1)} : V^{(2)} : V^{(3)} = 9,95 : 4,02 : 5,35 = 2,47 : 1,0 : 1,33. \quad (3.95)$$

За наведеними співвідношеннями найменший об'єм матеріалу, що витрачається, найменші довжини обкладок і радіус нульової обкладки відповідають **другому** варіанту при постійній аксіальній складовій поля і постійних уступах. За **третьім** варіантом, трохи нижчі показники (об'єм матеріалу на 35% більший, ніж у другому варіанті). Але оскільки виконати остов із постійною товщиною шарів і постійними уступами простіше, ніж при змінній товщині шарів, то **на практиці застосовують як другий, так і третій варіант**. Перший варіант практично не використовують, тому що об'єм матеріалу в 2,47 рази більший, а довжина останньої обкладки в 5,35 разів більша, ніж за другим варіантом.

У більшості випадків проектувальники вимушені враховувати додаткові обмеження, що накладаються на довжину останньої обкладки l_n і радіус нульової

обкладки r_0 .

Довжина заземленої обкладки повинна бути більша від довжини з'єднувальної втулки, завдяки чому зменшується напруженість електричного поля біля країв втулки і усувається коронування. Зазвичай край обкладки має виходити за межі втулки на значення $0,1 l_{\text{в.п}}$, де $l_{\text{в.п}}$ – довжина верхньої покритишки вводу. Те саме стосується і нижньої частини вводу. Довжину верхньої покритишки вводу згідно з (2.9) беруть в 1,45 рази більшу від суми довжин уступів у верхній частині вводу. Визначаючи суму довжин уступів за співвідношенням (2.11), одержують, що довжина останньої обкладки повинна бути не меншою від

$$l_n = l_{\text{з.в.}} + 0,145 \frac{U}{E_{\text{а.в}}}, \quad (3.96)$$

де $l_{\text{з.в.}}$ – задана з конструктивних міркувань довжина з'єднувальної втулки.

Радіус нульової обкладки не може бути меншим за радіус струмоведучої труби r_t , значення якого обмежене умовою нагрівання труби струмом навантаження. Виділена на одиниці довжини потужність

$$P_c = \frac{I^2 \rho}{\pi(r_t^2 - r_b^2)} = \frac{I^2 \rho_0 (1 + \alpha t_c)}{\pi(r_t^2 - r_b^2)}, \quad (3.97)$$

де I – струм, А; ρ – питомий опір матеріалу труби при температурі t_c , Ом·см (для міді $\rho_0 = 1,72 \cdot 10^{-6}$ Ом·см при 0°C ; температурний коефіцієнт $\alpha = 0,0042$, град $^{-1}$, r_b – внутрішній радіус струмоведучої труби (для стрижня $r_b = 0$)).

Виділена в стрижні тепла енергія передається шляхом теплопровідності через ізоляційний остов до фарфорової покритишки, а звідти – у навколишнє середовище. Потужність теплового потоку, переданого шляхом теплопровідності через ізотермічну поверхню площею S у напрямі x , визначають за відомим законом Фур'є

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} S, \quad (3.98)$$

де T – абсолютна температура; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(см·К).

Для одиниці довжини циліндричної поверхні радіусом r закон Фур'є

набуває вигляду

$$P_l = -\lambda 2\pi r \frac{dT}{dr}. \quad (3.99)$$

Якщо через ізоляційний остов передається тільки теплова енергія від струмоведучого стрижня, тобто, якщо виділення тепла в самому остові немає, то спад температури на остові згідно з (3.99) визначають за виразом

$$\Delta T = \int_{T_0}^{T_c} dT = -\frac{P_c}{2\pi\lambda} \int_{r_n}^{r_0} \frac{dr}{r} = \frac{P_c}{2\pi\lambda} \ln \frac{r_n}{r_0}. \quad (3.100)$$

Підсумовуючи (3.97) і (3.100), можна одержати, що радіус струмоведучого стрижня має бути не менше

$$r_c = \sqrt{\frac{I^2 \rho}{\pi P_c} + r_B^2} = \sqrt{B \cdot I^2 + r_B^2}, \quad (3.101)$$

де

$$B = \frac{\rho \ln \frac{r_n}{r_0}}{2\pi^2 \lambda \Delta T}. \quad (3.102)$$

Орієнтовно можна прийняти $\lambda = 2 \cdot 10^{-3}$ Вт/(см·К); $\rho = 1,72 \cdot 10^{-6}$ Ом·см; $r_n/r_0 = 4,1$; $\ln(r_n/r_0) = 1,41$. При цьому

$$B = \frac{0,62 \cdot 10^{-4}}{\Delta T} \text{ см/А}.$$

Отже,

$$r_c = \sqrt{\frac{0,62 \cdot 10^{-4} I^2}{\Delta T} + r_B^2}. \quad (3.103)$$

Значення ΔT рекомендується брати від 10°C (для вводів 500 кВ) до 40°C (для вводів 35 кВ).

Вводи випускаються на номінальні струми 600, 1000, 1400, 1500, 1800 і 2000 А. Отже, радіус струмоведучого стрижня має бути в межах 0,7 ÷ 2,5 см, що в багатьох випадках більший від оптимального значення радіуса нульової обкладки.

З урахуванням зазначених обмежень відмінність між розглянутими вище

трьома варіантами виконання остова може бути значно меншою, ніж без урахування обмежень. Тому доцільно розрахувати всі три варіанти і порівняти їх між собою. Послідовність розрахунку з урахуванням обмежень така.

Перший варіант ($E_r = \text{const}$):

- визначити довжину останньої обкладки за формулами (3.30) і (3.96); із двох отриманих значень взяти більше;
- обчислити кількість шарів за формулою (3.15);
- знайти r_n , використовуючи вираз (3.17);
- визначити r_0 , за рівністю (3.20) і порівняти з радіусом струмоведучого стрижня (3.103); якщо $r_0 < r_c$, то вважати $r_0 = r_c$ і перерахувати r_n за формулою (3.20) і l_n за (3.17);
- знайти l_0 за виразом (3.23);
- розрахувати радіуси і довжини всіх інших обкладок за формулами (3.31) і (3.32), а також аксіальну напруженість поля за виразом (3.14).

Другий варіант ($E_a = \text{const}$):

- визначити l_n за формулами (3.53) і (3.96) і взяти більше значення;
- знайти Δl і n за рівняннями (3.55) і (3.56);
- обчислити $l_0 = l_n + \Delta l \cdot n$;
- визначити r_0 за формулою, що впливає з (3.43),

$$r_0 = \frac{U(l_0 + l_n)}{2l_0 E_{r_{\max}} \ln \frac{l_0}{l_n}}; \quad (3.104)$$

- порівняти r_0 з r_c , обчисленими за виразом (3.103); якщо $r_0 < r_c$, то прийняти $r_0 = r_c$;

- підбиранням знайти r_n , що задовольняє рівність

$$r_n = \frac{U(l_0 + l_n)}{2l_n E_{r_{\max}} \ln \frac{r_n}{r_0}}; \quad (3.105)$$

- розрахувати радіуси і довжини всіх інших обкладок за формулами (3.57), (3.59) і (3.60), а також радіальну напруженість поля за (3.43).

Третій варіант ($\Delta l = \text{const}$; $\delta = \text{const}$):

- визначити l_n за формулами (3.80) і (3.96) і взяти більше значення;
- визначити r_0 за формулою, що впливає з (3.70):

$$r_0 = l_n \left(\frac{E_{a \max}}{E_{r \max}} \right); \quad (3.106)$$

- порівняти r_0 з r_c , обчисленим за виразом (3.103); якщо $r_0 < r_c$, то прийняти $r_0 = r_c$;

- підбиранням знайти кількість шарів n , за якої виконується умова

$$E_r = \frac{U(l_0 + l_n)}{2r_n l_n \ln \frac{r_n}{r_0}} < E_{r \max}, \quad (3.107)$$

де $l_0 = l_n + n\Delta l$; $r_0 = r_n - n\delta$; при цьому Δl визначається співвідношенням (3.55);

- розрахувати радіуси і довжини всіх інших обкладок, використовуючи рівняння (3.83) і (3.84), а також ємності за виразом (3.87);

- знайти еквівалентну ємність остова за формулою (3.89), спад напруги на всіх шарах згідно з (3.88) і визначити аксіальну і радіальну складові поля за виразами (3.4) і (3.5).

4 РОЗРАХУНОК ФАРФОРОВОЇ ПОКРИШКИ

Розрахунок фарфорової покришки складається з механічного та електричного розрахунків. Внутрішній діаметр фарфорової покришки визначають виходячи з радіуса r_n останньої (біля фланця) обкладки, додавши $6 \div 8$ мм, тобто

$$d_{\text{вн}} = 2[r_n + (0,06 \div 0,08)], \text{ м.}$$

Товщину фарфору визначають з умови його руйнування в найбільш навантаженому перетині згинальною силою. Згинальний момент, що діє в кожному перетині ізолятора,

$$M_{\text{згн}} = P_{\text{згн}} x, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (4.1)$$

де $P_{\text{згн}}$ – згинальна сила, прикладена до кінця ізолятора; x – відстань від місця

прикладення згинальної сили до розглядуваного перетину.

Найбільший згинальний момент буде в перетині, якщо $x = L_1$, де L_1 – довжина ізолятора від місця прикладення сили, до місця закладення ізолятора в з'єднувальній втулці. Зовнішній діаметр ізолятора у місці з'єднувальної втулки

$$D = d_{\text{вн}} + 2\Delta_{\text{ф}}, \text{ м} \quad (4.2)$$

де $\Delta_{\text{ф}}$ – обрана товщина фарфору (зазвичай $20 \div 60$ мм).

Момент інерції для кільцевого перетину ізолятора, яким є фарфорова покришка,

$$J = \frac{\pi(D^4 - d_{\text{вн}}^4)}{64}, \text{ м}^4 \quad (4.3)$$

Тоді момент опору згину ізолятора знаходять за формулою:

$$W = \frac{2J}{D}, \text{ м}^3 \quad (4.4)$$

Припускаючи, що $x = l + 0,1l$, де l – довжина зовнішньої (повітряної) покришки, знайденої за рівнянням (2.9), можна за (4.1) визначити згинальний момент, вибравши силу, діючу на ізолятор з такого ряду: 110 кВ – 5 кН; 220 кВ – 9 кН; 330 кВ – 14 кН; 500 кВ – 18 кН.

Механічне напруження в перетині кріплення покришки в з'єднувальній втулці визначають за формулою

$$\delta_{\text{згн}} = M_{\text{згн}} / W, \text{ Н/м}^2 \text{ або Па} \quad (4.4)$$

Перетин фарфорової покришки

$$S = \frac{\pi}{4}(D^2 - d_{\text{вн}}^2), \text{ м}^2 \quad (4.5)$$

Розраховане за виразом (4.4) механічне напруження має бути меншим, ніж значення $\delta_{\text{доп}}$, знайдене за графіком рис. 4.1 для розрахованого за формулою (4.5) перетину фарфорової покришки. Якщо вона виявилась більшою, то це свідчить про те, що товщину фарфору обрано занадто малою. Необхідно зробити повторний розрахунок зі збільшеною товщиною стінки.

Відхилення розрахованого значення механічного напруження від допустимого має бути в межах $10 \div 20 \%$, тобто $\delta_{\text{доп}} = (1,1 \div 1,2) \delta_{\text{згн.}}$.

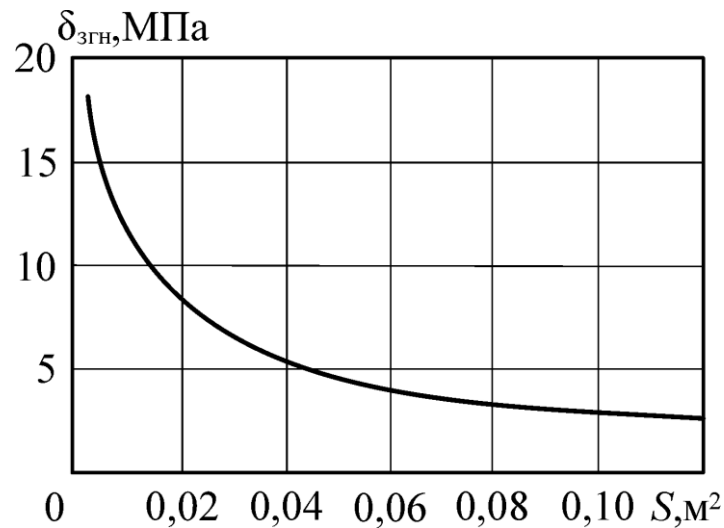


Рисунок 4.1 - Залежність межі міцності фарфору ($\delta_{\text{доп}}$) при згині від площі перетину

Електричний розрахунок полягає у визначенні значень розрядних напруг запроектованої фарфорової покришки та їх зіставленні з розрядними напругами (див. табл. 2.1).

На основі електричного розрахунку ізоляційного остова були отримані основні його розміри – довжину повітряного та масляного кінців, діаметр у середній частині. Щоб спроектувати фарфорові покришки, необхідно визначити їх довжину, скориставшись для цього формулами (2.9).

Для забезпечення роботи покришки повітряного кінця вводу під дощем та в умовах підвищеної вологості й забруднення необхідно спроектувати ребра. Кількість ребер для ізолятора зовнішнього використання в нормальних умовах знаходять за формулою

$$n = 1,5 + 0,065U_{\text{ном}}, \quad (4.6)$$

де $U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга проектованого вводу.

Отримане за (4.6) значення n округляють до найближчого більшого. Форму ребра ізолятора зображено на рис.4.2. Співвідношення між вильотом ребра a та відстанню між двома сусідніми ребрами l

$$\frac{a}{l} \approx 0,5 \div 1,0 \quad (4.7)$$

Збільшення a понад $0,5l$ не підвищує розрядну напругу. На практиці здебільшого беруть $a = 50 \div 80$ мм. Кут нахилу ребра α вибирають в діапазоні $20 \div 30^\circ$. На кінці ребра формують так звану крапельницю, завдяки якій розриваються дощові струминки по поверхні ізолятора та зменшується імовірність попадання води на нижній бік ребра.

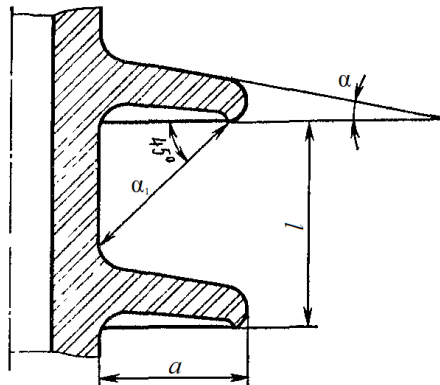


Рисунок 4.2 - Форма ребер фарфорової покрішки

Кількість, розміри та форму ребер, розраховують виходячи з повної довжини шляху витoku $L_{\text{вит}}$, яку знаходять за формулою

$$L_{\text{вит}} = U_{\text{н.р}} \cdot l_{\text{пит.в}}, \quad (4.8)$$

де $U_{\text{н.р}}$ - найбільша робоча напруга, а $l_{\text{пит.в}}$ – питома довжина шляху витoku.

Отримане за формулою (4.8) значення $L_{\text{вит}}$ повинно бути рівним або меншим за фактичне значення шляху витoku запроєктованої покрішки. Якщо ця умова не виконується, то потрібно змінити кількість, розміри або форму ребер і виконати розрахунок за формулами (4.6 – 4.8) знову.

Проектуючи нижню фарфорову покрішку, яка знаходиться в маслі, слід врахувати, що вимоги до її конструкції менш вибагливі – вона має менш розвинуту поверхню, оскільки не підпадає під вплив зовнішнього середовища. Кількість малорозвинених сферичних ребер не перевищує $3 \div 8$ для покрішок класу $110 \div 330$ кВ.

Отримані розміри фарфорової покрішки повітряного кінця використовують в подальших розрахунках теплової стійкості вводу.

5 РОЗРАХУНОК СТІЙКОСТІ ОСТОВА ДО ТЕПЛОВОГО ПРОБОЮ

Тепловий пробій остова можливий, оскільки ізоляція остова, як і кожний реальний діелектрик, має провідність і під впливом електричного поля в ній виникають діелектричні втрати, що збільшуються зі зростанням температури.

Зростання провідності та діелектричних втрат під час розігріву діелектрика через струм, що протікає крізь нього, у свою чергу підвищує температуру. За деякої критичної напруженості поля тепловиділення буде перевищувати тепловіддачу і розігрів діелектрика призведе до втрати електричної міцності та теплового руйнування матеріалу [1].

Для визначення тепловиділення і тепловіддачі ізоляційного остова необхідно розрахувати розподіл температури по радіусу остова $T = f(r)$. Розподіл температури є розв'язком диференціального рівняння теплопровідності, що за наявності внутрішніх джерел тепла має вигляд

$$c\rho \frac{dT}{dt} = \lambda \nabla^2 T + q, \quad (5.1)$$

де c – питома теплоємність, Дж/(кг·град); ρ – густина матеріалу, кг/м³; T – температура, °С; t – час, с; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·град); ∇^2 – оператор Лапласа температурного поля; q – інтенсивність внутрішніх джерел тепла, Вт/м³.

Оскільки інтенсивність внутрішніх джерел тепла q є складною функцією температури і напруженості електричного поля, які змінюються в просторі та часі, то інтегрування диференціального рівняння (2.1) у загальному випадку утруднене. Тому, аналізуючи теплову стійкість вводів, розглядають тільки сталий розподіл температури, вважаючи, що $dT/dt = 0$.

Розподіл температури визначають для різних граничних умов. Зокрема, для різних значень температури струмоведучого стрижня T_c обчислюють загальну потужність P_v , виділювану всередині вводу, і потужність P_0 , що відводиться від вводу в навколишнє середовище, тобто обчислюють залежності $P_v = f(T_c)$ і $P_0 = f(T_c)$, рис. 5.1. Якщо графіки цих залежностей перетинаються, то

точка перетину характеризує температуру, при якій виділена в остові потужність відводиться в оточуючий простір, тобто

$$P_B = P_0. \quad (5.2)$$

Точка перетину кривих P_B та P_0 є точкою теплової рівноваги вводу (рис.5.1, точка A).

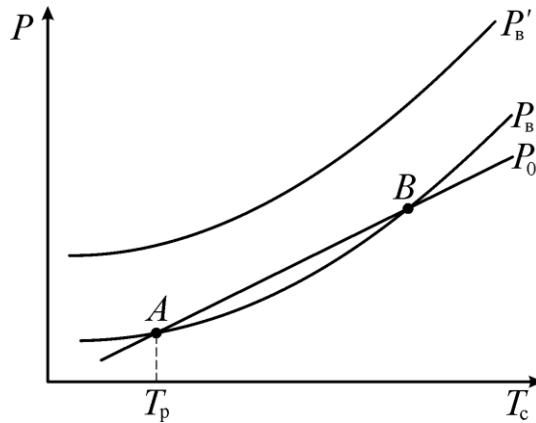


Рисунок 5.1 - До розрахунку теплової стійкості ізоляційного остова

Якщо ж графіки не перетинаються ні при якій температурі T_c , тобто завжди

$$P_B > P_0. \quad (5.3)$$

то тепла рівновага не можлива і має місце тепловий пробій вводу.

Якщо $dT/dt = 0$, то рівняння (5.1) набуває вигляду:

$$\lambda \operatorname{div} \operatorname{grad} T + q = 0. \quad (5.4)$$

Скористаємося відомою теоремою Остроградського - Гаусса, відповідно до якої потік вектора $\vec{F}$ крізь замкнену поверхню S дорівнює інтегралу від дивергенції $\vec{F}$, розповсюдженому по об'єму V , розташованому всередині поверхні S :

$$\oint_S \vec{F} d\vec{S} = \int_V \operatorname{div} \vec{F} dV. \quad (5.5)$$

Для об'єму V за диференціальним рівнянням (5.4)

$$\lambda \int_V \operatorname{div} \operatorname{grad} T dV + \int_V q dV = 0, \quad (5.6)$$

або з урахуванням (5.5)

$$\lambda \oint_S \text{grad} T d\vec{S} + \int_V q dV = 0. \quad (5.7)$$

З урахуванням циліндричної симетрії:

$$S = 2\pi r l; \quad \text{grad} T = \frac{dT}{dr}; \quad V = \pi r^2 l. \quad (5.8)$$

Оскільки у всіх точках циліндричної поверхні значення градієнта температури однакове, рівняння (5.7) з урахуванням (5.8) можна записати у вигляді

$$\lambda 2\pi r l \frac{dT}{dr} + P_B = 0, \quad (5.9)$$

де P_B – потужність, що виділяється всередині об'єму V

$$P_B = \int_V q dV. \quad (5.10)$$

Рівняння (5.9) можна отримати безпосередньо із закону Фур'є (3.99), якщо $P_B = Pl$.

У межах одного шару ізоляції між конденсаторними обкладками можна вважати

$$P_B = \text{const}. \quad (5.11)$$

Для шару ізоляції між струмоведучими стрижнем і найближчою до нього обкладкою потужність P_B являє собою потужність, що виділяється в струмоведучому стрижні:

$$P_{B1} = I^2 R_0 l (1 + \alpha T_c), \quad (5.12)$$

де I – струм у стрижні, А; R_0 – активний опір одного погонного сантиметра стрижня при 0°C , Ом/см; T_c – температура стрижня, $^\circ\text{C}$; α – температурний коефіцієнт активного опору матеріалу стрижня (для міді $\alpha = 0,0042$ град $^{-1}$).

Для всіх наступних шарів ізоляції

$$P_{B(i+1)} = P_{Bi} + \Delta P_{Bi}, \quad (5.13)$$

де ΔP_{Bi} – потужність, що виділяється в попередньому шарі ізоляції:

$$\Delta P_{bi} = \Delta U_i^2 \omega C_i \operatorname{tg} \delta_i, \quad (5.14)$$

де ΔU_i – спад напруги в даному шарі; C_i – ємність цього шару; ω - кутова частота; $\operatorname{tg} \delta_i$ – кут діелектричних втрат i -го шару.

Прийнято вважати, що тангенс кута діелектричних втрат змінюється з підвищенням температури за експонентним законом [5]:

$$\operatorname{tg} \delta_i = \operatorname{tg} \delta_0 e^{m(T_i - T_0)}, \quad \text{де } T_0 = 20^\circ \text{C} \quad (5.15)$$

Для паперово-масляного ізоляційного остова можна взяти наближені значення:

$$m = 2 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}; \quad \operatorname{tg} \delta_0 = 0,5 \cdot 10^{-2}. \quad (5.16)$$

Для спрощення розрахунків припустимо, що в прошарку масла між остовом і внутрішньою стінкою фарфорової покритишки та в самій покритищі втрат енергії немає, тобто $\Delta P_{bi} = 0$.

Із формули (4.9) одержуємо

$$dT = -\frac{P_b}{2\pi/\lambda} \cdot \frac{dr}{r}. \quad (5.17)$$

Після інтегрування в межах i -го шару ізоляції маємо:

$$\Delta T_i = \int_{T_i}^{T_{i+1}} dT = -\frac{P_{bi}}{2\pi l_i \lambda} \int_{r_i}^{r_{i+1}} \frac{dr}{r} = -\frac{P_{bi}}{2\pi l_i \lambda} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}. \quad (5.18)$$

Знак мінус у рівнянні (5.18) свідчить про те, що температура зменшується зі збільшенням радіуса ($\Delta T < 0$).

Коефіцієнтами теплопровідності можуть бути:

- для паперово-масляної ізоляції $\lambda = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(см}\cdot\text{град)}$;
- для трансформаторного масла $\lambda = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(см}\cdot\text{град)}$;
- для фарфору $\lambda = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(см}\cdot\text{град)}$.

Використовуючи формули (5.13), (5.14), (5.18), можемо розрахувати перепад температур на кожному прошарку ізоляції, а також в маслі та фарфоровому тілі ізолятора і визначити температуру поверхні ізолятора.

Тепловіддачу із зовнішньої поверхні ізоляції наближено визначають за формулою Ньютона

$$P_0 = K_T S_{\pi} (T_{\text{із}} - T_0), \quad (5.19)$$

де K_T – коефіцієнт тепловіддачі; S_{π} – площа кільцевої зовнішньої поверхні ізоляції; $T_{\text{із}}$ – температура поверхні ізоляції; $T_0 = 35^{\circ}\text{C}$ – температура навколишнього середовища.

Коефіцієнт тепловіддачі дорівнює:

- для гладкої поверхні фарфору чи паперу в повітрі

$$K_T = 10^{-3} \text{ Вт/}(\text{см}^2 \cdot \text{град});$$

- для фарфору з урахуванням поверхні ребер

$$K_T = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/}(\text{см}^2 \cdot \text{град}).$$

Тепловіддача в навколишнє середовище здійснюється через поверхню фарфорової покритишки, яка знаходиться в повітрі.

Наведені співвідношення дозволяють розрахувати виділену та відведену потужності і таким чином визначати стійкість ізоляційного остова до теплового пробою.

6 ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ, КРИТЕРІЙ ОЦІНЮВАННЯ І ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Згідно з порядковим номером студента у алфавітному списку групи, обрати відповідний варіант завдання на курсову роботу з таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Варіанти завдань на курсову роботу

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$U_{\text{н}}, \text{кВ}$	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220
$I_{\text{н}}, \text{А}$	150	315	400	500	150	315	400	500	150	315	400	500
$l_{\text{з.в}}, \text{см}$	36	36	36	36	40	40	40	40	45	45	45	45
$\delta, \text{см}$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Курсова робота складається з пояснювальної записки.

Пояснювальна записка (у друкованому або електронному вигляді) складається з тексту та пояснювальних графіків загальним обсягом 20 – 30 аркушів формату А4. Пояснювальна записка містить:

- титульний аркуш;
- завдання на курсову роботу;
- зміст із вказівкою номерів сторінок;
- вступ з аналізом конструктивних особливостей проектуваного вводу;
- використаний список літератури.

За виконання курсової роботи студенти отримують наступні бали:

Пояснювальна записка	Захист роботи	Максимальний бал
до 40	до 60	100

Захист курсової роботи оцінюється за наступною шкалою:

Оцінка	
За 100-бальною шкалою	Для захисту курсової роботи
90-100	Відмінно
74-89	Добре
60-73	Задовільно
0-59	Незадовільно

Порядок виконання роботи

Виконати розрахунок герметичного високовольтного трансформаторного вводу ГМТ 110/200 з паперово-масляною ізоляцією конденсаторного типу на номінальну напругу $U_n = 110$ кВ, номінальний струм $I_n = 200$ А, довжиною з'єднувальної втулки $l_{з.в} = 30$ см і товщиною ізоляційного прошарку $\delta = 0,2$ см.

Розрахунок ізоляційного остову з постійною радіальною напруженістю електричного поля.

За формулами (2.1) і (2.2) отримуємо:

$$E_p = 10,5 \cdot \delta^{-0,58} = 26,7 \text{ кВ/см}; \quad E_{\text{вип}} = 32 \cdot \delta^{-0,58} = 81,4 \text{ кВ/см.}$$

З таблиці 2.1 знаходимо

$$U_{с.в} = 295 \text{ кВ}; \quad U_{н.р} = 126 \text{ кВ.}$$

Відповідно до (2.9) розрахункова напруга

$$U = 1,1U_{\text{с.в}} = 1,1 \cdot 295 = 324,5 \text{ кВ.}$$

Робоча напруженість поля, зведена до розрахункової напруги, $E_{\text{роб}} = E_{\text{р}} \cdot U / U_{\text{ф}} = 26,7 \cdot 324,5 / 72,7 = 119,2 \text{ кВ/см}$, де фазна напруга $U_{\text{ф}} = U_{\text{н.р}} / \sqrt{3} = 126 / \sqrt{3} = 72,7 \text{ кВ}$. З огляду на рівність (3.16) допустима радіальна напруженість поля, зведена до розрахункової напруги, дорівнює отриманій:

$$E_{r\text{max}} = 119,2 \text{ кВ/см.}$$

Оскільки нижня половина трансформаторного вводу працює в маслі, а верхня – у повітрі і виходячи з (2.7) і (2.11) середню аксіальну напруженість у нижній частині приймемо $E_{\text{а.н}} = 10 \text{ кВ/см}$, а у верхній - $E_{\text{а.в}} = 5 \text{ кВ/см}$. Тоді розрахункова аксіальна складова поля, визначена за виразом (3.7), $E_{\text{а}} = 3,33 \text{ кВ/см}$. Оскільки найбільша аксіальна напруженість не повинна перевищувати зазначену розрахункову величину, приймаємо $E_{\text{amax}} = 3,33 \text{ кВ/см}$. Кількість прошарків за рівністю (3.15)

$$n = \frac{U}{E_{r\text{max}} \delta} = \frac{324,5}{119,2 \cdot 0,2} = 13,6 = 14.$$

Оптимальні розміри відповідно до (3.26), (3.28), (3.29) і (3.30):

$$r_0 = \frac{U}{\sqrt{2} E_{r\text{max}}} = \frac{324,5}{1,41 \cdot 119,2} = 1,93 \text{ см};$$

$$r_{14} = 2,41 r_0 = 2,41 \cdot 1,93 = 4,65 \text{ см};$$

$$l_{14} = 1,71 \frac{U}{E_{a\text{max}}} = 1,71 \frac{324,5}{3,33} = 166,6 \text{ см};$$

$$l_0 = 2,41 \cdot l_{14} = 401,6 \text{ см.}$$

Радіус і довжину першої обкладки визначаємо за формулами (3.31) і (3.32):

$$r_1 = r_0 + \delta = 1,93 + 0,2 = 2,13 \text{ см}; \quad l_1 = \frac{r_{14} \cdot l_{14}}{r_1} = \frac{4,65 \cdot 166,6}{2,13} = 363,7 \text{ см.}$$

Аксіальна напруженість поля в першій обкладці згідно з рівнянням (3.14) дорівнює

$$E_{a1} = E_r \frac{r_1^2}{r_0 l_0} = 119,2 \frac{2,13^2}{1,93 \cdot 401,6} = 0,70 \text{ кВ/см.}$$

Аналогічно виконуємо розрахунок для інших обкладок. Результати розрахунку зведено в табл. 6.2.

Як видно з результатів розрахунків, розміри останньої обкладки відрізняються від отриманих вище оптимальних розмірів через округлення кількості прошарків до цілого числа. Також видно, що при постійній радіальній напруженості електричного поля має місце сильна нерівномірність поля в аксіальному напрямі, що потребує значного збільшення довжини нульової обкладки.

Таблиця 6.2 – Результати розрахунків ізоляційного остову з $E_r = \text{const}$

Номер обкладки	Радіус r_i , см	Довжина l_i , см	Аксіальна напруженість поля E_{ai} , кВ/см
0	1,93	401,5	0,57
1	2,13	363,7	0,70
2	2,33	332,5	0,84
3	2,53	306,2	0,99
4	2,73	283,8	1,15
5	2,93	264,4	1,32
6	3,13	247,5	1,51
7	3,33	232,6	1,71
8	3,53	219,5	1,92
9	3,73	207,7	2,14
10	3,93	197,1	2,38
11	4,13	187,6	2,63
12	4,33	178,9	2,89
13	4,53	171,0	3,16
14	4,73	163,8	3,45

Розрахунок ізоляційного остову з постійною аксіальною напруженістю електричного поля.

Як і в попередньому прикладі одержуємо $U = 324,5 \text{ кВ}$; $E_{r\text{max}} = 119,2 \text{ кВ/см}$;
 $E_{a\text{max}} = 3,33 \text{ кВ/см}$.

Оптимальні розміри відповідно до (3.51) - (3.54) становлять:

$$r_{14} = 1,8 \frac{U}{E_{r \max}} = 1,8 \frac{324,5}{119,2} = 4,9 \text{ см}; \quad r_0 = 0,438 \frac{U}{E_{r \max}} = 0,438 \frac{324,5}{119,2} = 1,19 \text{ см};$$

$$l_{14} = 0,32 \frac{U}{E_{a \max}} = 0,32 \frac{324,5}{3,33} = 31,2 \text{ см}; \quad l_0 = 1,32 \frac{U}{E_{a \max}} = 1,32 \frac{324,5}{3,33} = 128,6 \text{ см}.$$

Довжина уступу, визначена за формулою (3.55),

$$\Delta l = \delta_{\min} \frac{E_{r \max}}{E_{a \max}} = 0,2 \frac{119,2}{3,33} = 7,16 \approx 7,2 \text{ см}.$$

Кількість прошарків

$$n = \frac{l_0 - l_n}{\Delta l} = \frac{128,6 - 31,2}{7,2} = 13,5 = 14.$$

Збільшення радіуса з переходом від нульової до першої обкладки відповідно до (3.59) становить

$$\Delta r_0 = \frac{2 \ln \frac{r_{14}}{r_0} \Delta l}{l_0^2 - l_{14}^2} \cdot r_0 l_0 = \frac{2 \ln \frac{4,9}{1,19} \cdot 7,2}{128,6^2 - 31,2^2} 1,19 \cdot 128,6 = 0,2 \text{ см}.$$

Радіус і довжина першої обкладки, розраховані за формулами (3.57) і (3.60), дорівнюють

$$l_1 = l_0 - \Delta l = 128,6 - 7,2 = 121,4 \text{ см};$$

$$r_1 = r_0 + \Delta r_0 = 1,19 + 0,2 = 1,39 \text{ см}.$$

Радіальна напруженість поля поблизу першої обкладки (3.43)

$$E_{r1} = \frac{U}{2l_1 r_1} \cdot \frac{l_0 + l_{14}}{\ln \frac{r_{14}}{r_0}} = \frac{324,5}{2 \cdot 121,4 \cdot 1,39} \cdot \frac{128,6 + 31,2}{\ln \frac{4,9}{1,19}} = 108,6 \text{ кВ/см}.$$

Результати розрахунків для інших обкладок наведено в табл. 6.3.

Таблиця 6.3 – Результати розрахунків ізоляційного остову з $E_a = \text{const}$

Номер обкладки	Радіус r_i , см	Довжина l_i , см	Добуток $r_i \cdot l_i$, см ²	Радіальна напруженість E_r , кВ/см
0	1,19	128,6	153,0	119,7
1	1,39	121,4	168,8	108,6
2	1,61	114,2	184,0	99,6
3	1,85	107,0	198,2	92,5
4	2,11	99,8	210,8	86,9

5	2,39	92,6	221,1	82,9
6	2,68	85,4	228,7	80,1
7	2,98	78,2	232,8	78,7
8	3,28	71,0	233,0	78,7
9	3,59	63,8	228,8	80,1
10	3,89	56,6	220,0	83,3
11	4,17	49,4	206,2	88,9
12	4,44	42,2	187,6	97,7
13	4,69	35,0	164,2	111,6
14	4,90	31,2	152,9	119,9

Проведені розрахунки показують, що ізоляційний остов з постійною аксіальною напруженістю електричного поля дає суттєве скорочення довжини вводу, у порівнянні з попереднім випадком.

Розрахунок ізоляційного остову з постійною товщиною прошарків і постійними уступами.

З технологічної точки зору зручніше виконувати ізоляційний остов з постійною довжиною уступів та постійною товщиною прошарків.

Потрібно розрахувати оптимальні розміри паперово-масляного ізоляційного остова з постійною товщиною шарів $\delta = 0,2$ см і постійними уступами для трансформаторного вводу на номінальну напругу 110 кВ.

Як і у попередніх прикладах одержуємо:

$$U = 324,5 \text{ кВ}; \quad E_{r\max} = 119,2 \text{ кВ/см}; \quad E_{a\max} = 3,33 \text{ кВ/см}; \quad \Delta l = 7,2 \text{ см}.$$

За формулами (3.78) - (3.81) визначаємо оптимальні розміри:

$$n = 1,245 \frac{U}{\delta \cdot E_{r\max}} = 1,245 \frac{324,5}{0,2 \cdot 119,2} = 16,9 = 17;$$

$$r_{17} = 1,81 \frac{U}{E_{r\max}} = 1,81 \frac{324,5}{119,2} = 4,93 \text{ см};$$

$$r_0 = \frac{r_n}{3,2} = \frac{4,9}{3,2} = 1,53 \text{ см};$$

$$l_n = 0,565 \frac{U}{E_{a\max}} = 0,565 \frac{324,5}{3,33} = 55,1 \text{ см};$$

$$l_0 = 1,81 \frac{U}{E_{a \max}} = 1,81 \frac{324,5}{3,33} = 176,4 \text{ см.}$$

Довжину і радіус першої обкладки визначаємо за формулами (3.83) і (3.84):

$$l_1 = l_0 - \Delta l = 176,4 - 7,2 = 169,2 \text{ см;}$$

$$r_1 = r_0 + \delta = 1,53 + 0,2 = 1,73 \text{ см.}$$

Ємність між першою і нульовою обкладками

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l_1}{\ln \frac{r_1}{r_0}} = \frac{6,28 \cdot 3,5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 169,2}{\ln \frac{1,73}{1,53}} = 2,68 \cdot 10^{-9} \text{ Ф,}$$

де $\epsilon = 3,5$ – відносна діелектрична проникність паперово-масляної ізоляції, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14} \text{ Ф/см}$ – електрична стала.

Подальші розрахунки зведено у табл. 6.4.

Таблиця 6.4 - Результати розрахунку остова з постійною товщиною шарів і постійними уступами

Номер шару	Радіус r_i , см	Довжина l_i , см	Ємність C_i , нФ	Спад напруги ΔU , кВ	Радіальна напруженість E_r , кВ/см	Аксіальна напруженість E_a , кВ/см
0	1,53	176,4	-	-	-	-
1	1,73	169,2	2,68	22,41	112,1	3,11
2	1,93	162,0	2,88	20,84	104,2	2,89
3	2,13	154,8	3,05	19,66	98,3	2,73
4	2,33	147,6	3,20	18,76	93,8	2,61
5	2,53	140,4	3,32	18,10	90,5	2,51
6	2,73	133,2	3,41	17,63	88,2	2,45
7	2,93	126,0	3,47	17,32	86,6	2,41
8	3,13	118,8	3,50	17,15	85,8	2,38
9	3,33	111,6	3,50	17,13	85,7	2,38
10	3,53	104,4	3,48	17,24	86,2	2,39
11	3,73	97,2	3,43	17,50	87,5	2,43
12	3,93	90,0	3,35	17,91	89,6	2,49
13	4,13	82,8	3,24	18,50	92,5	2,57
14	4,33	75,6	3,11	19,30	96,5	2,68
15	4,53	68,4	2,95	20,37	101,9	2,83
16	4,73	61,2	2,76	21,79	109,0	3,03
17	4,93	54,0	2,54	23,67	118,4	3,29
$C_{\text{екв}} = 0,185 \text{ нФ}$				$\sum \Delta U = 325,27 \text{ кВ}$		

Проведені розрахунки показують, що найменший об'єм матеріалу вводу, найменші довжини обкладок і радіус нульової обкладки відповідають **другому** варіанту при постійній аксіальній складовій поля.

При проектуванні вводів слід враховувати додаткові обмеження, що накладаються на довжину останньої обкладки l_n і радіус нульової обкладки r_0 .

Довжина заземленої обкладки l_n повинна бути **більша** від довжини з'єднувальної втулки $l_{з.в}$, а радіус нульової обкладки r_0 **не може бути меншим** за радіус струмопровідного електрода r_c .

Розрахунок остова з постійною аксіальною напруженістю поля з урахуванням обмежень $l_{з.в} = 30$ см і $I_n = 200$ А.

Як і в попередніх прикладах приймаємо: $U = 324,5$ кВ; $E_{а.в} = 3,33$ кВ/см.

З таблиці 6.3 $l_n = 31,2$ см, а за формулою (3.96) - $l_n = 39,4$ см. Беремо $l_n = 39,4$ см. З тієї ж таблиці 6.3 одержуємо $n = 14$, $\Delta l = 7,2$ см. Тоді $l_0 = 39,4 + 14 \cdot 7,2 = 140,2$ см.

Згідно з рівнянням (3.104)

$$r_0 = \frac{U(l_0 + l_n)}{2l_0 E_{r_{\max}} \ln \frac{l_0}{l_n}} = \frac{324,5 \cdot (140,2 + 39,4)}{2 \cdot 140,2 \cdot 119,2 \cdot \ln \frac{140,2}{39,4}} = 1,37 \text{ см.}$$

Радіус струмопровідного стрижня ізоляційного вводу знайдемо зі співвідношення

$$r_c = \sqrt{\frac{I_n}{\pi j}} = \sqrt{\frac{200}{3,14 \cdot 100}} = 0,80 \text{ см.}$$

де j – густина струму у стрижні. Для вводів з паперово-масляною ізоляцією приймають $j = 100$ А/см². Оскільки $r_c < r_0$, то це призведе до зростання радіальної складової електричного поля біля поверхні стрижня, що може викликати пробій ізолятора. Тому струмопровідний стрижень слід робити у вигляді труби з зовнішнім радіусом $r_c = r_0 = 1,77$ см і внутрішнім радіусом

$$r_b = \sqrt{r_0^2 - r_c^2} = \sqrt{1,37^2 - 0,8^2} = 1,11 \text{ см.}$$

Далі знаходимо підбиранням (ітераціями) r_n , що задовільнить рівність:

$$r_n = \frac{U(l_0 + l_n)}{2l_n E_{r\max} \ln \frac{r_n}{r_0}} = \frac{324,5 \cdot (140,2 + 39,4)}{2 \cdot 39,4 \cdot 119,2 \cdot \ln \frac{r_n}{1,37}} = \frac{5,21}{\ln \frac{r_n}{1,37}} = 4,44 \text{ см.}$$

Результати розрахунків для інших обкладок наведено в табл. 6.5.

Результати розрахунків показують, що E_r на перших двох і останніх двох обкладках перевищує $E_{r\max} = 119,2$ кВ/см. Тоді слід збільшити кількість обкладок з $n = 14$ до 15 і повторити розрахунки (результати у правих колонках).

$$l_0 = 39,4 + 15 \cdot 7,2 = 147,4 \text{ см;}$$

$$r_0 = \frac{U(l_0 + l_n)}{2l_0 E_{r\max} \ln \frac{l_0}{l_n}} = \frac{324,5 \cdot (147,4 + 39,4)}{2 \cdot 147,4 \cdot 119,2 \cdot \ln \frac{147,4}{39,4}} = 1,31 \text{ см;}$$

$$r_n = \frac{U(l_0 + l_n)}{2l_n E_{r\max} \ln \frac{r_n}{r_0}} = \frac{324,5 \cdot (147,4 + 39,4)}{2 \cdot 39,4 \cdot 119,2 \cdot \ln \frac{r_n}{1,31}} = \frac{6,45}{\ln \frac{r_n}{1,31}} = 4,89 \text{ см;}$$

$$r_B = \sqrt{r_0^2 - r_c^2} = \sqrt{1,31^2 - 0,8^2} = 1,04 \text{ см.}$$

Таблиця 6.5 - Результати розрахунку остова з постійною аксіальною напруженістю поля при $l_{3,B} = 25$ см, $I_H = 200$ А

Номер обкладки	Радіус r_i , см		Довжина l_i , см		Добуток $r_i \cdot l_i$, см ²		Радіальна напруженість E_r , кВ/см	
0	1,37	1,31	140,2	147,4	192,1	193,1	129,0	118,9
1	1,55	1,49	133,0	140,2	206,2	208,9	120,2	109,9
2	1,74	1,69	125,8	133,0	218,9	224,8	113,2	102,1
3	1,94	1,90	118,6	125,8	230,1	239,0	107,7	96,1
4	2,16	2,13	111,4	118,6	240,6	252,6	103,0	90,9
5	2,39	2,37	104,2	111,4	249,0	264,0	99,5	87,0
6	2,62	2,62	97,0	104,2	254,1	273,0	97,5	84,1
7	2,86	2,88	89,8	97,0	256,8	279,4	96,5	82,2
8	3,10	3,14	82,6	89,8	256,1	282,0	96,8	81,4
9	3,34	3,41	75,4	82,6	251,8	281,7	98,4	81,5
10	3,58	3,68	68,2	75,4	244,2	277,5	101,5	82,7
11	3,81	3,94	61,0	68,2	232,4	268,7	106,6	85,5
12	4,03	4,19	53,8	61,0	216,8	255,6	114,3	89,8
13	4,23	4,43	46,6	53,8	197,1	238,3	125,7	96,4
14	4,41	4,65	39,4	46,6	173,8	216,7	142,6	106,0
15		4,89		39,4		192,7		119,2

З розрахунків видно, що при збільшенні кількості обкладок до $n = 15$,

радіальна складова електричного поля не перевищує максимально припустимого значення.

Розрахунок фарфорової покришки. Розрахунок фарфорової покришки складається з механічного та електричного частин. Внутрішній діаметр фарфорової покришки $d_{\text{вн}}$ визначають виходячи з радіуса r_n останньої (біля фланця) обкладки, додавши $0,6 \div 0,8$ см, тобто

$$d_{\text{вн}} = 2[r_n + (0,6 \div 0,8)] = 2[4,89 + 0,7] = 11,2 \text{ см};$$

Зовнішній діаметр ізолятора D у місці з'єднувальної втулки

$$D = d_{\text{вн}} + 2\Delta_{\text{ф}} = 11,2 + 2 \cdot 4 = 19,2 \text{ см};$$

де $\Delta_{\text{ф}}$ – обрана товщина фарфору (зазвичай $2 \div 6$ см).

Момент інерції для кільцевого перетину ізолятора, яким є фарфорова покришка,

$$J = \frac{\pi(D^4 - d_{\text{вн}}^4)}{64} = \frac{3,14 \cdot (19,2^4 - 11,2^4)}{64} = 5895,4 \text{ см}^4.$$

Тоді момент опору згину ізолятора знаходять за формулою:

$$W = \frac{2J}{D} = \frac{2 \cdot 5895,4}{19,2} = 614,1 \text{ см}^3 = 6,141 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

Товщину фарфору визначають з умови його руйнування в найбільш навантаженому перетині згинальною силою. Згинальний момент, що діє в кожному перетині ізолятора,

$$M_{\text{згн}} = P_{\text{згн}} \cdot x,$$

де $P_{\text{згн}}$ – згинальна сила, прикладена до кінця ізолятора; x – відстань від місця прикладення згинальної сили до розглядуваного перетину.

Припускаючи, що $x = l + 0,1 \cdot l$, де l – довжина зовнішньої (повітряної) покришки, знайденої за рівнянням (2.6), можна визначити згинальний момент, вибравши силу, діючу на ізолятор з такого ряду: 110 кВ – 5 кН; 220 кВ – 9 кН; 330 кВ – 14 кН; 500 кВ – 18 кН.

$$l = 1,45 \sum \lambda_{\text{в}} = 1,45 \cdot n \cdot \frac{\Delta l}{2} = 1,45 \cdot 15 \cdot \frac{7,2}{2} = 78,3 \text{ см};$$

$$x = 78,3 + 7,8 = 86,1 \text{ см};$$

$$M_{\text{згн}} = 5000 \cdot 0,861 = 4305 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Перетин фарфорової покритишки

$$S = \frac{\pi(D^2 - d_{\text{вн}}^2)}{4} = \frac{3,14 \cdot (19,2^2 - 11,2^2)}{4} = 190,9 \text{ см}^2 = 1,91 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2.$$

Механічне напруження в перетині кріплення покритишки в з'єднувальній втулці визначають за формулою

$$\delta_{\text{згн}} = M_{\text{згн}} / W = 4305 / (6,141 \cdot 10^{-4}) = 7,01 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2 = 7,01 \text{ МПа}.$$

Розраховане механічне напруження має бути меншим, ніж значення $\delta_{\text{доп}}$, знайдене за графіком рис. 4.1 для розрахованого перетину фарфорової покритишки. Якщо вона виявилась більшою, то це свідчить про те, що товщину фарфору обрано занадто малою. Необхідно зробити повторний розрахунок зі збільшеною товщиною стінки. У даному випадку $\delta_{\text{згн}} = 7,01 \text{ МПа}$ менше $\delta_{\text{доп}} = 8 \text{ МПа}$. Відхилення розрахованого значення механічного напруження від допустимого лежить в межах 10%.

Кількість ребер для ізолятора зовнішнього використання в нормальних умовах знаходять за формулою

$$n = 1,5 + 0,065 \cdot U_{\text{н}} = 1,5 + 0,065 \cdot 110 = 8,65 = 9.$$

Розрахунок стійкості остова до теплового пробою. Розрахунок виконаємо для остова, параметри якого наведено в табл. 6.5. При цьому необхідно врахувати, що спад напруги на шарах, відповідає розрахунковій напрузі 324,5 кВ, а стійкість до теплового пробою варто перевірити при найбільшій робочій напрузі 126 кВ.

Внутрішній радіус фарфорової покритишки дорівнює 5,6 см, а зовнішній – 9,6 см.

Активний опір одного погонного сантиметра струмопровідного стрижня при температурі 0°C становить

$$R_0 = \frac{\rho}{\pi \cdot (r_c^2 - r_b^2)} = \frac{1,72 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot (1,31^2 - 1,04^2)} = 7,87 \cdot 10^{-7} \text{ Ом/см},$$

де $\rho = 1,72 \cdot 10^{-6}$ Ом·см – питомий опір міді при 0°C .

Нехай температура стрижня дорівнює 80°C . Потужність, виділена струмом 200 А у стрижні, згідно із формулою (5.12)

$$P_{\text{в1}} = I^2 R_0 l (1 + \alpha T_c) = 200^2 \cdot 7,87 \cdot 10^{-7} \cdot 147,4 \cdot (1 + 0,0042 \cdot 80) = 6,199 \text{ Вт},$$

де $\alpha = 0,0042$ град $^{-1}$ – температурний коефіцієнт активного опору міді.

Спад температури в першому шарі визначаємо за формулою (5.18):

$$\Delta T_1 = -\frac{P_{\text{в1}}}{2\pi l_1 \lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} = -\frac{6,199}{6,28 \cdot 140,2 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} \ln \frac{1,49}{1,31} = -0,26^\circ\text{C},$$

де $\lambda = 2,0 \cdot 10^{-3}$ Вт/(см·град) – коефіцієнт теплопровідності паперово-масляної ізоляції.

Згідно із формулами (5.14) і (5.15) у кожному шарі виділяється однакова потужність

$$\Delta P_{\text{вi}} = \Delta U_i^2 \omega C_i \operatorname{tg} \delta_i = 8,4^2 \cdot 10^6 \cdot 314 \cdot 2,12 \cdot 10^{-9} \cdot 0,5 \cdot 10^{-2} \cdot e^{2 \cdot 10^{-2} (80-20)} = 0,78 \text{ Вт}$$

де $\Delta U_i = U_{\text{н.р}}/n = 126/15 = 8,4$ кВ – спад робочої напруги в одному шарі; $\omega = 314$

с $^{-1}$ – кутова частота струму; $C_i = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l_i}{\ln(r_i/r_{i-1})} = \frac{6,28 \cdot 3,5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 140,2}{\ln(1,49/1,31)} =$

$= 2,12 \cdot 10^{-9}$ Ф – електроємність кожного шару; $\epsilon = 3,5$ – відносна діелектрична проникність паперово-масляної ізоляції, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14}$ Ф/см – електрична стала; $\operatorname{tg} \delta_i = \operatorname{tg} \delta_0 e^{m(T_i - T_0)}$ – кут діелектричних втрат i – го шару (для паперово-масляної ізоляції $m = 2 \cdot 10^{-2}$ град $^{-1}$; $T_0 = 20^\circ\text{C}$; $\operatorname{tg} \delta_0 = 0,5 \cdot 10^{-2}$).

Отже, температура другого шару становить $T_2 = 80 - 0,26 = 79,74^\circ\text{C}$, а потужність теплового потоку, переданого через цей шар, дорівнює $6,199 + 0,78 = 6,979$ Вт.

Для другого шару

$$\Delta T_2 = -\frac{P_{\text{в2}}}{2\pi l_2 \lambda} \ln \frac{r_3}{r_2} = -\frac{6,979}{6,28 \cdot 133,0 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} \ln \frac{1,69}{1,49} = -0,53^\circ\text{C};$$

$$\Delta P_{\text{в2}} = \Delta U_2^2 \omega C_2 \operatorname{tg} \delta_2 = 8,4^2 \cdot 10^6 \cdot 314 \cdot 2,12 \cdot 10^{-9} \cdot 0,5 \cdot 10^{-2} \cdot e^{2 \cdot 10^{-2} (79,74-20)} = 0,77 \text{ Вт}.$$

Подальші обчислення наведено в табл. 6.6.

Тепловіддачу із зовнішньої поверхні ізоляції наближено визначають за

формулою Ньютона

$$P_0 = K_T S_{\Pi} (T_{\text{із}} - T_0) = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 1210 \cdot (79,84 - 35) = 109 \text{ Вт};$$

$$P_0 = K_T S_{\Pi} (T_{\text{із}} - T_0) = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 1210 \cdot (59,77 - 35) = 60 \text{ Вт};$$

$$P_0 = K_T S_{\Pi} (T_{\text{із}} - T_0) = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 1210 \cdot (39,79 - 35) = 12 \text{ Вт}.$$

де $K_T = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{град})$ - коефіцієнт тепловіддачі; $S_{\Pi} = 2\pi r_n \cdot l_n = 6,28 \cdot 4,89 \cdot 39,4 = 1210 \text{ см}^2$ - площа зовнішньої поверхні ізолятора; $T_{\text{із}}$ - температура поверхні ізолятора; $T_0 = 35^\circ\text{C}$ - температура навколишнього середовища.

Таблиця 6.6 - Результати розрахунку теплової стійкості вводу

Радіус r_i , см	Довжина l_i , см	$\Delta P_{\text{в}}$, Вт при 20°C	T , $^\circ\text{C}$	$P_{\text{в}}$, Вт	T , $^\circ\text{C}$	$P_{\text{в}}$, Вт	T , $^\circ\text{C}$	$P_{\text{в}}$, Вт
1,31	147,4	-	80	-	60	-	40	-
1,49	140,2	0,7799	79,55	6,199	59,58	5,809	39,60	5,420
1,69	133,0	0,7729	79,02	6,979	59,10	6,332	39,17	5,770
1,90	125,8	0,7648	78,45	7,752	58,59	6,851	38,72	6,118
2,13	118,6	0,7560	77,79	8,517	58,03	7,364	38,22	6,462
2,37	111,4	0,7462	77,14	9,273	57,46	7,872	37,73	6,804
2,62	104,2	0,7366	76,43	10,019	56,86	8,375	37,20	7,142
2,88	97,0	0,7262	75,65	10,756	56,21	8,872	36,65	7,477
3,14	89,8	0,7150	74,83	11,482	55,53	9,363	36,08	7,808
3,41	82,6	0,7033	73,92	12,197	54,79	9,847	35,46	8,136
3,68	75,4	0,6906	72,94	12,900	53,99	10,325	34,80	8,460
3,94	68,2	0,6771	72,02	13,591	53,25	10,796	34,18	8,780
4,19	61,0	0,6649	71,04	14,268	52,46	11,260	33,53	9,096
4,43	53,8	0,6520	70,01	14,933	51,63	11,717	32,85	9,408
4,65	46,6	0,6387	68,92	15,585	50,77	12,166	32,15	9,716
4,89	39,4	0,6249	67,75	16,223	49,84	12,609	31,40	10,019
			$P_0 = 109 \text{ Вт}$		$P_0 = 60 \text{ Вт}$		$P_0 = 12 \text{ Вт}$	

Оскільки $P_{\text{в}} < P_0$ при всіх досліджених температур струмопровідного стрижня, то має місце тепла рівновага і тепловий пробій ізоляції високовольтного вводу неможливий.

Додаток А

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩІЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
"ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ"

Кафедра електричної інженерії

КУРСОВА РОБОТА

з дисципліни «Техніка високих напруг»
на тему:

«РОЗРАХУНОК ВИСОКОВОЛЬТНОГО ВВОДУ З ПАПЕРОВО-МАСЛЯНОЮ
ІЗОЛЯЦІЄЮ КОНДЕНСАТОРНОГО ТИПУ»

Варіант №____

Студента 4 курсу групи _____
спеціальності 144 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

(підпис)

(П.І.Б.)

Керівник: доцент кафедри ЕлІн,
к.т.н., доц. Власенко М.М.

Національна шкала _____

Кількість балів: _____

Члени комісії _____ Власенко М.М.
(підпис)

(підпис)

ДОДАТОК Б

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет МЕХТ
Кафедра електричної інженерії

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Завідувач кафедри

_____ (Колларов О.Ю.)

«____» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
НА КУРСОВУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

_____ (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розрахунок високовольтного вводу з паперово-масляною ізоляцією конденсаторного типу

2. Керівник роботи: Власенко М.М., к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Основні пункти завдання:

1. Провести розрахунки ізоляційного остова для трьох різних конструкцій;
2. Для кращої з трьох конструкцій провести оптимізацію;
3. Провести розрахунок фарфорової покривки;
4. Оцінити теплову стійкість ізоляційного вводу.

4. Вихідні дані:

Вихідні дані взяти з Таблиці 6.1 варіантів завдань з методичних вказівок до виконання курсової роботи згідно з порядковим номером студента у групі

5. Рекомендована література (у разі необхідності):

1. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Техніка високих напруг» на тему розрахунок високовольтного вводу з паперово-масляною ізоляцією конденсаторного типу для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної та заочної форм навчання. М.М. Власенко – Луцьк: ДонНТУ, 2023. – 56 с.

Студент:

_____ (дата)

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи:

_____ (дата)

_____ (підпис)

Власенко М.М.

_____ (прізвище та ініціали)

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ізоляція електротехнічного обладнання: Курс лекцій: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньо-професійних програм «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: О. Р. Проценко – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 133 с.
2. Василюк С. В., Василюк К. С. Техніка високих напруг: навчальний посібник. – Рівне : НУВГП, 2018. – 187 с.
3. Приймальні та експлуатаційні випробування електроустаткування: Навч. посібник / Уклад.: В.Б. Абрамов, В.О. Бржезицький, О.Р. Проценко, під ред. Бржезицького В.О. – К.:НТУУ «КПІ», 2015. – 235 с.