

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

О. Г. Кессаєв, Ю. Г. Гонтар

**РОЗРАХУНОК ТА КОНСТРУЮВАННЯ
ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВВОДІВ**

Навчальний посібник
для студентів напряму підготовки 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
денної та заочної форми навчання

Затверджено
редакційно-видавничою
радою НТУ «ХП»,
протокол № 3 від
12.10.2023 р.

Харків
НТУ «ХП»
2023

УДК 621.3 (075) + 621.315.62 (075)

К 36

Рецензенти:

О.О. Мірошник, д-р техн. наук, професор ДБТУ

В.Є. Плюгін, д-р техн. наук, професор ХНУМГ ім. О.М. Бекетова

Кессаєв О. Г.

К 36 Розрахунок та конструювання високовольтних вводів : навч. посіб.
/ Кессаєв О. Г., Гонтар Ю. Г. – Харків : НТУ «ХПІ», 2023. – 106 с.

ISBN

Навчальний посібник відповідає програмі навчальної дисципліни «Розрахунок та конструювання електроізоляційних конструкцій» і призначений для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» вищих навчальних закладів усіх форм навчання та може бути використаний студентами при виконанні курсових і дипломних робіт.

Табл. 4. Іл. 43 Бібліогр. 17

УДК

621.315.626

ISBN

© О.Г. Кессаєв, Ю.Г. Гонтар

2023 р.

ВСТУП

Навчальний посібник відповідає програмі навчальної дисципліни «Розрахунок та конструювання електроізоляційних конструкцій» і призначений для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» вищих навчальних закладів усіх форм навчання та може бути використаний студентами при виконанні курсових і дипломних робіт.

Матеріал посібника охоплює огляд конструкцій високовольтних ввідів та можливості їх оптимізації. Розглянуто технологію виготовлення ввідів, методику електричного розрахунку. Окремо приділено увагу визначенню механічної міцності покриття вводу. Наведено методику розрахунку теплової стійкості прохідного ізолятора конденсаторного типу.

Послідовність викладення матеріалу сприяє використанню посібника студентами як для самостійного вивчення окремих тем навчальної дисципліни, так і для виконання курсової роботи та індивідуальних розрахунково-графічних завдань.

1. ВИСОКОВОЛЬТНІ ВВОДИ. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Найскладнішими електротехнічними конструкціями, як у конструктивному виконанні, так і при проведенні розрахунків, вважаються високовольтні вводи та силові конденсатори, які широко застосовуються в електроенергетиці.

Високовольтні вводи – конструктивний елемент трансформаторів, масляних вимикачів, реакторів, комплектних елегазових розподільних пристроїв (КРПЕ). Окрім цього, вводи експлуатуються і як самостійний елемент у розподільчих установках закритого типу.

Вводи відрізняються великою різноманітністю форм, конструкцій та розмірів і розраховані на різні напруги та номінальні струми.

За призначенням вводи поділяються на:

- вводи для масляних вимикачів;
- вводи для трансформаторів;
- вводи для КРПЕ;
- лінійні (прохідні) вводи.

За видом внутрішньої ізоляції вводи бувають:

- з маслобар'єрною ізоляцією;
- з паперово-масляною (ОІР) ізоляцією;
- з елегазовою ізоляцією;
- з твердою ізоляцією (типів RBP, RIP, RIN).

RBP-ізоляція (Resin Bounded Paper) була розроблена на початку 60-х років 20 ст. Остов виготовляється намотуванням на трубу кабельного паперу, покритого ізоляційним лаком, який склеює шари паперу. Зовні остов покривається епоксидним компаундом.

RIP (Resin Impregnated Paper) – крепований папір виробництва фірм «Weidman Systems International AG» (Швейцарія) або «Karl Fislage GmbH & Co. KG» (Німеччина),

який потім просочується епоксидним компаундом під вакуумом з подальшим затвердінням під тиском.

RIN-ізоляція (Resin Impregnated Nonwoven) – полімерний нетканний матеріал, просочений епоксидним компаундом з подальшим затвердінням.

За типом зовнішньої ізоляції відповідно до ГОСТ 9920-89 вводи розрізняються залежно від ступеня забруднення довкілля (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Типи зовнішньої ізоляції вводів

Вводи, розроблені до 01.07.1990 р.	Вводи, розроблені після 01.07.1990 р.
А – нормальна зовнішня ізоляція	I – легкий ступінь забруднення
Б – посилена зовнішня ізоляція	II – середній ступінь забруднення
В – особливо посилена зовнішня ізоляція	III – сильний ступінь забруднення
	IV – дуже сильний ступінь забруднення

За номінальною напругою вводи виготовляються на класи напруги: 20, 24, 35, 66, 110, 150, 220, 330, 500, 750, 1150 та 1500 кВ.

За номінальним струмом вводи розраховані на струми: 150, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 6300, 8000, 14000, 18000 та 20000 А.

За кліматичним виконанням вводи випускаються для експлуатації в районах:

- з помірним кліматом (У);
- з холодним кліматом (ХЛ);
- з помірним та холодним кліматом (УХЛ);

- із тропічним кліматом (Т);
- з вологим тропічним кліматом (ТБ);
- загальнокліматичного виконання (О).

Для маркування вводів використовують такі позначення:

Г – герметичний;

М – із масляним просоченням (Т – з твердим просоченням);

Т – для трансформаторів та реакторів (В – для вимикачів, Р – для спеціальних реакторів, Л – лінійний);

П – з вимірювальним конденсатором, призначеним для підключення ПВН;

А – з нормальною зовнішньою ізоляцією (Б – з підсиленою);

45 – допустимий кут нахилу до вертикалі, град.;

Х – клас напруги;

ХХ – номінальний струм, А;

У1 – виконання та категорія розташування.

Наприклад, ГМТПА-45-330/1000 У1 означає, що ввід герметичний, масляний, для силових трансформаторів, з виводом для ПВН, з нормальною зовнішньою ізоляцією, з допустимим кутом нахилу до вертикалі 45 градусів, номінальною напругою 330 кВ, допустимим струмом 1000 А, категорією виконання та розташування У1.

Вводи для трансформаторів і реакторів встановлюють під кутом від 0 до 60°, для масляних вимикачів – від 0 до 15°, а лінійні вводи – від 0 до 90°.

Метою розрахунку високовольтних вводів є забезпечення їхньої надійної роботи за умови різних електричних впливів, що можуть виявлятися в процесі експлуатації. При цьому необхідно виключити можливість:

- виникнення часткових розрядів, що призводять до пробою ізоляційного остову;
- розвиток теплового пробою ізоляційного остова;
- перекриття ізоляційного остову між краями вирівнювальних обкладок;

– покриття фарфорових покришок.

Основними етапами при проектуванні високовольтних вводів є: розрахунок зовнішньої ізоляції, визначення числа та розмірів ребер порцелянової покришки, розрахунок внутрішньої ізоляції, оцінка необхідності застосування конденсаторних обкладок для вирівнювання електричного поля, визначення радіальних розмірів, механічний розрахунок фарфорової покришки та вузла кріплення введення до апарату теплової стійкості, розрахунок маслорозширювача, радіуса екрану, пружин для компенсації теплового розширення струмопровідного стрижня, аналіз надійності та довговічності.

1.1 Високовольтні вводи для масляних вимикачів

Масляний вимикач – комутаційний апарат, призначений для оперативних включень та відключень окремих ланцюгів або електроустаткування в енергосистемі, у нормальних чи аварійних режимах при ручному чи автоматичному керуванні.

Високовольтний ввід є основним ізолюючим елементом вимикача, він забезпечує його надійну та безпечну роботу. Високовольтний ввід представляє собою прохідний ізолятор складної конструкції із зовнішньою та внутрішньою ізоляцією, призначений для роботи в несприятливих умовах довкілля. Розмірність вводу визначається класом напруги масляного вимикача.

Для масляних вимикачів випускаються вводи тільки з твердою внутрішньою ізоляцією конденсаторного типу за технологією RIP (Resin Impregnated Paper) як найбільш ефективною.

1.1.1 Конструкція вводу для масляних вимикачів

Контактна клемма, виготовлена з латуні, призначена для приєднання до неї високого потенціалу.

Корпус призначений для розміщення таких елементів конструкції вводу:

– газова подушка, що компенсує температурні зміни об'єму рідкого наповнювача і представляє собою вільний об'єм повітря;

– стяжний вузол, який забезпечує необхідну механічну міцність вводу;

– масловказівник (для контролю наявності рідкого наповнювача у вводі, представляє собою скляний диск, що не пропускає ультрафіолетові промені).

Наповнювач (масло) захищає внутрішню порожнину вводу від зволоження.

Фарфорова покришка – це зовнішня ізоляція вводу, яка забезпечує необхідну розрядну відстань і довжину шляху витокую її зовнішньої поверхні.

Ізоляційний остов – це внутрішня ізоляція вводу, що вирівнює електричне поле в радіальному та аксіальному напрямках.

Центральна труба призначена для намотування на неї внутрішньої ізоляції введення.

З'єднувальна втулка призначена для розміщення на ній вимірювального виводу та опорного фланцю вводу.

Опорний фланець призначений для закріплення вводу в місці його встановлення і, у свою чергу, кріпиться гвинтами до з'єднувальної втулки вводу.

Обкладка, що заземлюється, – це остання обкладка ізоляційного кістяка, яка має постійний електричний контакт з вимірювальним виводом.

Верхній екран застосовується в конструкції вводів з полімерною зовнішньою ізоляцією і призначений для вирівнювання зовнішнього електричного поля у верхній частині вводу (рис.1.2). На вводах з фарфоровою покришкою функції верхнього екрану виконує корпус. Полімерна зовнішня ізоляція застосовується як альтернатива фарфоровій на вводах 110 кВ

(рис. 1.2), вводи 35 кВ випускаються тільки з полімерною ізоляцією.



Рисунок 1.1 – Ввод з фарфоровою зовнішньою ізоляцією



Рисунок 1.2 – Ввод з полімерною зовнішньою ізоляцією

1.1.2 Вузли і деталі вводу масляних вимикачів

Внутрішня тверда RIP-ізоляція є головною конструктивною частиною вводу (рис. 1.3). Вона має високу надійність і тривалий термін експлуатації завдяки низьким діелектричним втратам і рівню часткових розрядів в ізоляції, її термічній стійкості. Ця ізоляція виключає застосування трансформаторного масла як ізоляційної компоненти, що значно підвищує зручність експлуатації вводів.

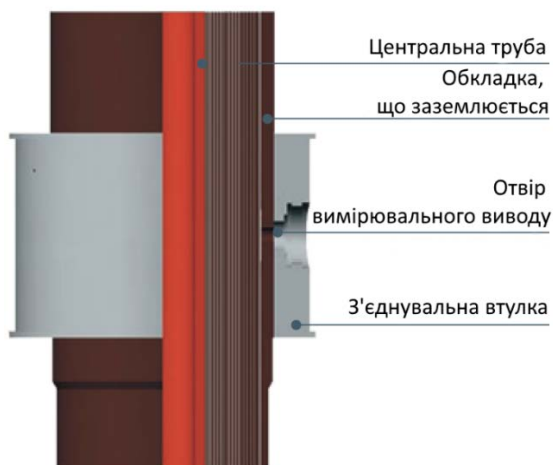


Рисунок 1.3 – Внутрішня RIP-ізоляція

Для вирівнювання електричного поля та рівномірного розподілу потенціалу всередині ізоляційного остову розташовуються конденсаторні обкладки. Найближча до центральної труби обкладка має з нею електричний контакт, остання (заземлювана) обкладка має постійний контакт зі шпилькою вимірювального виводу. Обкладка, що заземлюється, виготовлена з мідної фольги, що забезпечує можливість паяння провідника вимірювального виводу безпосередньо до обкладки, тим самим зводячи нанівець ймовірність втрати контакту провідника вимірювального виводу та обкладки. Матеріали, які

застосовуються при виготовленні ізоляційного остову, забезпечують необхідну механічну міцність і тріщиностійкість ізоляції, що повинно бути підтверджено механічними, кліматичними та сейсмічними випробуваннями, а також тривалим терміном експлуатації вводів із RIP-ізоляцією.

Зовнішня ізоляція закриває верхню частину ізоляційного остову, що розташовується поза масляним вимикачем, і виготовляється з фарфору (рис. 1.4) або полімеру (рис. 1.5).



Рисунок 1.4 – Профіль фарфорової покришки

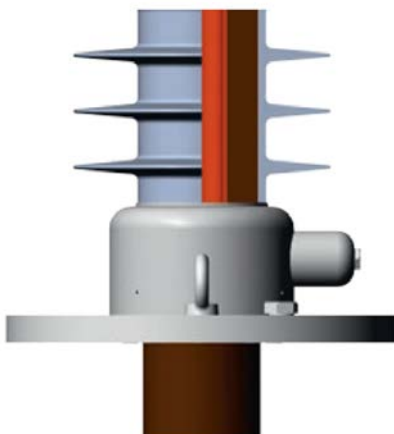


Рисунок 1.5 – Профіль полімерної покришки

Компенсатор тиску призначений для компенсації температурних змін об'єму рідкого наповнювача на вводах із

зовнішньою фарфоровою ізоляцією. Компенсатор представляє собою газову подушку, розташовану у верхній частині вводу.

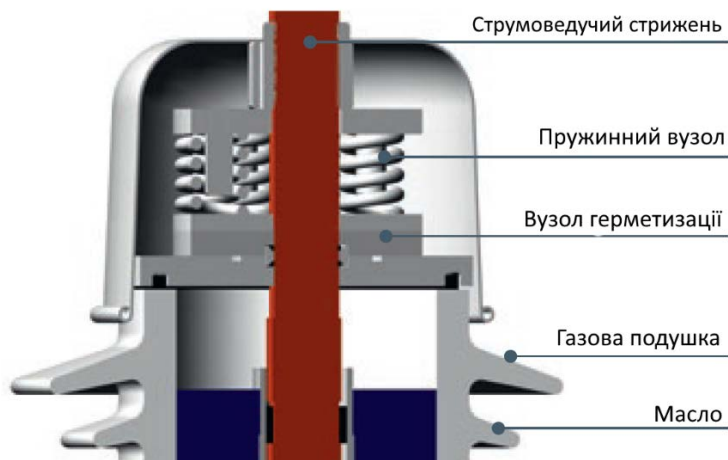


Рисунок 1.6 – Верхня частина вводів 110 кВ з рідинним наповнювачем

Зовнішня ізоляція забезпечує захист внутрішньої ізоляції від зволоження та необхідну довжину шляху витoku по зовнішній поверхні. У вводів 220 кВ для підвищення надійності зовнішня ізоляція встановлюється і на нижню частину ізоляційного остову.

У вводів 110 кВ безпосередній контроль рівня наповнювача не передбачено (рис. 1.6). У вводів 220 кВ наявність наповнювача контролюється візуально через скло масловказівника, розташованого на верхньому корпусі вводу (рис. 1.7). Об'єм газової подушки розрахований таким чином, щоб рівень наповнювача завжди знаходився вище за скло (рис. 1.8, а). При зниженні рівня нижче за розрахунковий на склі стають помітними вертикальні рисочки (рис. 1.8, б), що є сигналом до звернення до виробника.

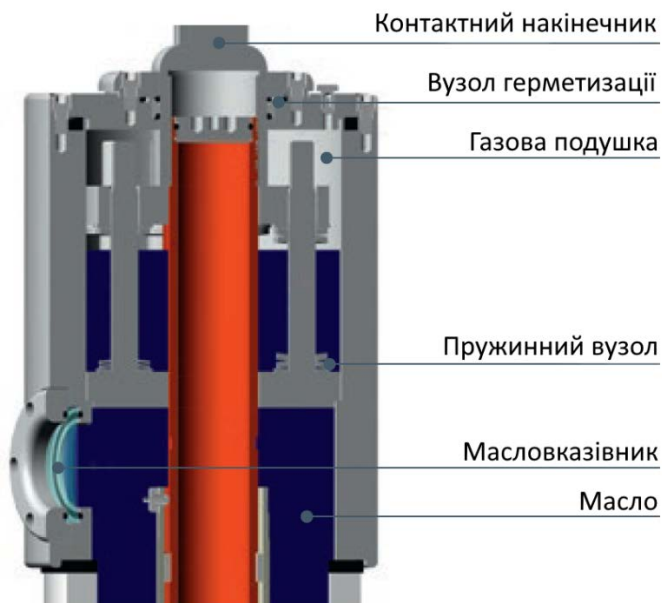


Рисунок 1.7 – Верхня частина вводів 220 кВ



Рисунок 1.8 – Нормальний (а) та знижений (б) рівні рідкого наповнювача

1.1.3 Вузли та деталі вводу для масляних вимикачів

Вимірювальний вивід від останньої зрівняльної обкладки ізоляційного остову служить для контролю стану внутрішньої

ізоляції і повинен бути обов'язково заземлений в час, коли не проводяться виміри.

У вимірювальних виводах можуть застосовуватися різні принципи заземлення. На рис.1.9 наведено вимірювальний вивід, заземлення та герметизація якого здійснюється накручуванням ковпака з пружинним контактом, а на рис. 1.10 – виводу, заземлення якого здійснюється за допомогою спеціального пружинного мультиконтакту з подальшою можливістю візуального та інструментального контролю надійності заземлення. В цьому випадку ковпак служить лише для герметизації порожнини вимірювального виводу.

За спеціальними вимогами замовників виробники можуть виготовляти вводу з двома вимірювальними виводами.

У цьому випадку один вивід робиться від останньої зрівняльної обкладки ізоляційного остову, а другий – від передостанньої.

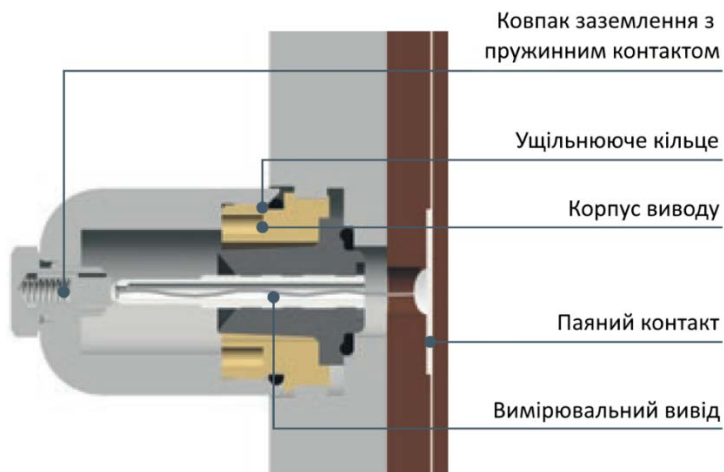


Рисунок 1.9 – Вимірювальний вивід з заземлюючим ковпаком

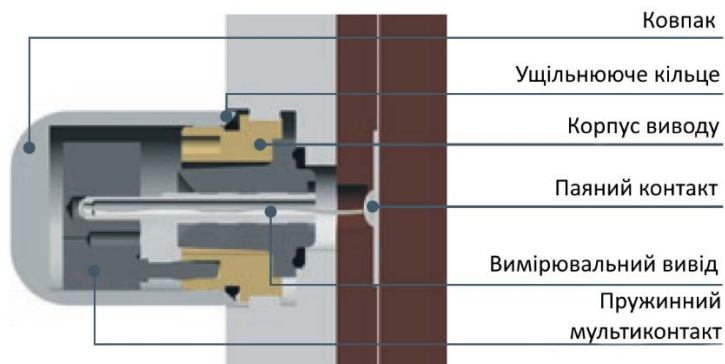


Рисунок 1.10 – Вимірювальний вивід з заземлюючим мультиконтактом

1.1.4 Підключення

Вид нижнього приєднання вводів 35 кВ визначається типом вимикача, на який вони встановлюються (рис. 1.11). Під'єднання вводів вищих класів напруги здійснюється за допомогою контактної наконечника, наведеного на центральний струмоведучий елемент вводу (рис. 1.12). Спуск від ошиновування у вводи 35 кВ приєднується до контактної шпильки (рис. 1.13), у вводи 110 і 220 кВ – до контактної клеми (рис. 1.14).

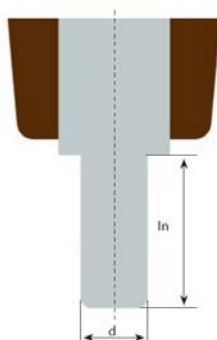


Рисунок 1.11 – Нижнє під'єднання вводів 35 кВ

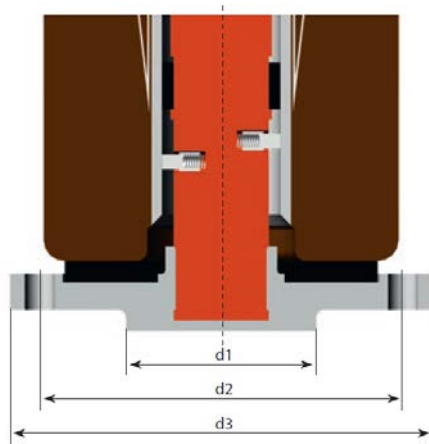


Рисунок 1.12 – Нижнє під'єднання вводів 110 и 220 кВ

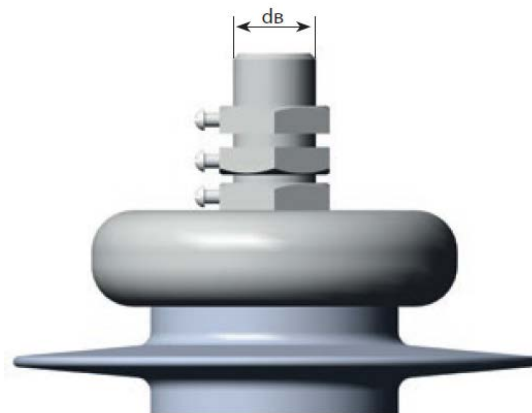


Рисунок 1.13 – Контактна шпилька вводу 35 кВ

1.2 Лінійні вводи

Лінійні високовольтні вводи призначені для встановлення в стінах та перекриттях будівель розподільчих пристроїв. Високовольтний ввід представляє собою прохідний ізолятор складної конструкції із зовнішньою та внутрішньою ізоляцією,

призначений для роботи в несприятливих умовах довкілля. Розмірність вводу визначається класом напруги розподільного пристрою.

В якості зовнішньої ізоляції може застосовуватися як полімерна ізоляція, так і фарфорова покришка. В цьому випадку простір між покришкою та внутрішньою ізоляцією заповнюється сухим наповнювачем.

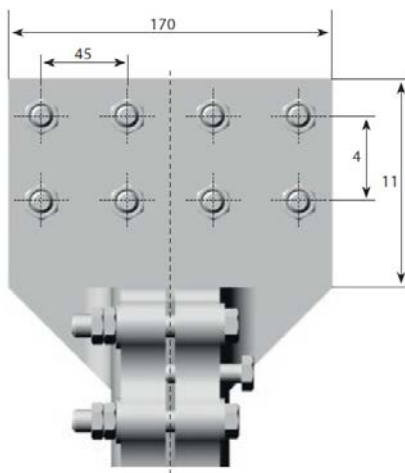


Рисунок 1.14 – Контактна клема вводу 220 кВ

Конструкція лінійного вводу ідентична конструкції вводу для масляних вимикачів.

Екрани застосовуються в конструкції вводів з полімерною зовнішньою ізоляцією і призначений для вирівнювання зовнішнього електричного поля у верхній та нижній частинах вводу (рис.1.16). У вводах з фарфоровою покришкою функції екранів виконують верхній та нижній фланці.

Полімерна ізоляція застосовується як альтернатива фарфоровій та виконує ті ж самі функції.



Рисунок 1.15 – Ввод з фарфоровою зовнішньою ізоляцією

Вводи з полімерною зовнішньою ізоляцією мають такі переваги:

- абсолютно суха, вибухо- та пожежебезпечна конструкція, що не потребує обслуговування;

- висока трекінгостійкість;
- стабільність властивостей ізоляції протягом всього строку експлуатації;
- гідрофобність зовнішньої ізоляції, що знижує вірогідність перекриття навіть за зволоження забрудненої ізоляції;
- еластичність полімерної ізоляції, що знижує ризик ушкодження при транспортуванні та монтажі;
- відсутність обмежень за величиною кута встановлення вводу до вертикалі;
- стійкість до сейсмічних навантажень;
- мінімальна маса;
- екологічна безпека.

1.2.1 Стяжний пружинний вузол

Призначений для компенсації різниці подовження центральної труби і фарфорової зовнішньої ізоляції, обумовленої різними температурними коефіцієнта лінійного розширення. Стяжний вузол створює зусилля стяжки, необхідне для забезпечення герметичності вводу за будь-яких температур довкілля шляхом створення необхідного тиску на ущільнюючу прокладку між корпусом компенсатору і фарфоровою покриткою.

1.2.2 Підключення

Підключення лінійних ввідів здійснюється за допомогою контактних клем, розташованих на обох кінцях вводу (рис. 1.17).

1.2.3 Вимірювальний вивід

Конструкція вимірювального виводу представлено на рис. 1.18 та 1.19. Заземлення здійснюється за допомогою спеціального пружинного мультиконтакту з подальшою можливістю візуального та інструментального контролю надійності

заземлення. Ковпак в цьому випадку служить тільки для герметизації порожнини вимірювального виводу.



Рисунок 1.16 – Ввод з полімерною зовнішньою ізоляцією

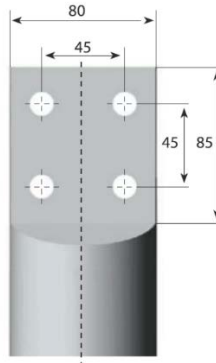


Рисунок 1.17 – Контактна клема

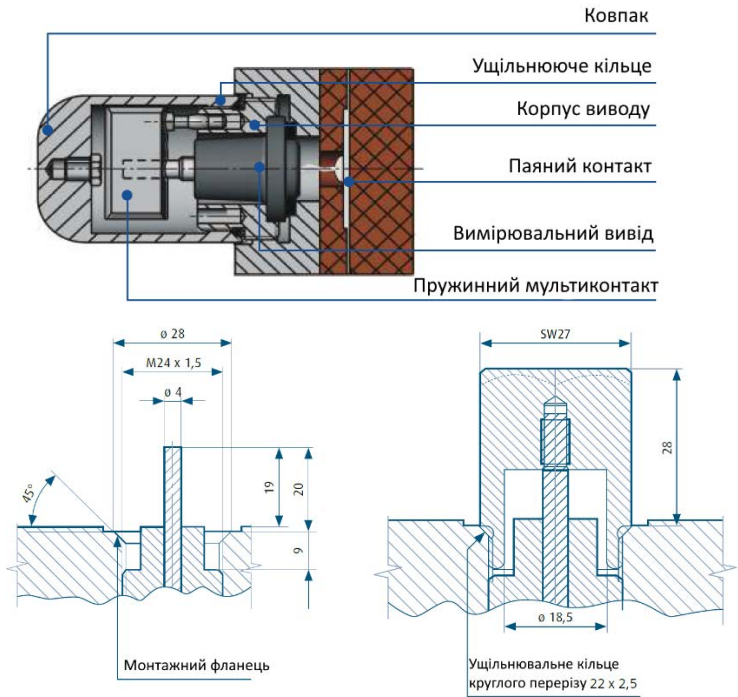


Рисунок 1.18 – Вимірювальний вивід з заземлюючим мультиконтактом



Рисунок 1.19 – Вимірювальний вивід зі знятим ковпаком

1.3 Високовольтні вводи з RIN-ізоляцією для трансформаторів та шунтуючих реакторів

RIN-ізоляція (Resin Impregnated Nonwoven) – полімерний нетканий матеріал, просочений епоксидним компаундом з подальшим затвердінням. RIN-ізоляція використовується з метою підвищення вологостійкості внутрішньої ізоляції високовольтних вводів у складних умовах або при порушенні правил їх експлуатації та зберігання. Основна ізоляція – полімерний нетканий матеріал, що не містить целюлози, внаслідок чого має гранично високу гідрофобність і стійкість до атмосферної вологи, що практично виключає зволоження ізоляції.

Переваги вводів з RIN-ізоляцією:

- низький рівень водопоглинання основної ізоляції навіть за інтенсивного впливу вологи;
- низький коефіцієнт діелектричних втрат основної ізоляції: $\tan \delta$ 0,20-0,25%;

- відсутність часткових розрядів в ізоляції під час підйому напруги мережі до найбільшої робочої;
- висока теплопровідність та низький коефіцієнт теплового розширення, що веде до зменшення механічних напруг в елементах конструкції вводів, і, у свою чергу, забезпечує високу надійність та тривалий термін служби у дуже широкому спектрі робочих температур;
- застосування синтетичного полотна дозволяє відмовитися від термовакuumної сушки намотаної ізоляції, що суттєво скорочує термін виготовлення вводу.

1.3.1 Конструкція вводу

Контактна клема призначена для приєднання до неї високого потенціалу, виготовлена із мідного сплаву (рис. 1.20).

Корпус призначений для розміщення таких елементів конструкції вводу:

- **газова подушка** (вільний об'ємом повітря), що компенсує температурні зміни об'єму рідкого наповнювача;
- **стяжний пружинний вузол**, що забезпечує необхідну механічну міцність та герметичність конструкції вводу;
- **масловказівник** для контролю наявності рідкого наповнювача (масла) у вводі.

Наповнювач сухий, рідкий або газоподібний, що захищає внутрішню порожнину вводу від зволоження.

Зовнішня фарфорова ізоляція забезпечує захист внутрішньої ізоляції від зволоження та необхідну розрядну відстань та довжину шляху витоку по зовнішній поверхні.

Внутрішня RIN-ізоляція (Resin Impregnated Nonwoven) – полімерний нетканий матеріал, просочений епоксидним компаундом з подальшим затвердінням.



Рисунок 1.20 – Ввод з фарфоровою зовнішньою ізоляцією

Центральна труба призначена для намотування на неї внутрішньої ізоляції вводу.

З'єднувальна втулка призначена для розміщення на ній вимірювального виводу та опорного фланця вводу.

Опорний фланець призначений для закріплення вводу на устаткуванні.

Обкладка, що заземлюється, – остання обкладка ізоляційного остову, що має постійний електричний контакт з вимірювальним виводом.

Нижній екран вирівнює зовнішнє електричне поле у нижній частині вводу.

Верхній екран застосовується у конструкції вводів з полімерною зовнішньою ізоляцією і призначений для вирівнювання зовнішнього електричного поля у верхній частині вводу (рис. 1.21).

У вводах з фарфоровою покриттю функції верхнього екрану виконує корпус.

Полімерна ізоляція застосовується на вводах з внутрішньою RIN-ізоляцією як альтернатива фарфоровій покриттю та виконує ті ж функції (рис. 1.21).

Внутрішня тверда ізоляція RIN (рис. 1.22) є головною конструктивною частиною вводу. Основна ізоляція – полімерний нетканий матеріал, що не містить целюлози, внаслідок чого має гранично високу гідрофобність і стійкість до атмосферної вологи, що практично виключає зволоження ізоляції. Ця ізоляція виключає застосування трансформаторного масла як ізоляційного компонента, що значно підвищує зручність експлуатації вводів.

Для вирівнювання електричного поля та рівномірного розподілу потенціалу всередині ізоляційного остову розташовуються конденсаторні обкладки. Найближча до центральної труби обкладка має з нею електричний контакт,

остання обкладка, що заземлюється, має постійний контакт зі шпилькою вимірювального виводу.



Рисунок 1.21 – Ввод з полімерною зовнішньою ізоляцією

Матеріали, які застосовуються при виготовленні ізоляційного остову, забезпечують необхідну механічну міцність та тріщиностійкість ізоляції, що повинно підтверджуватися механічними, кліматичними та сейсмічними випробуваннями, а також результатами експлуатації вводів із RIN-ізоляцією.



Рисунок 1.22 – Внутрішня RIN-ізоляція

1.3.2 Нижня частина вводу

Нижня частина вводу пристосована для встановлення трансформаторів струму, які мають бути розташовані у межах обкладки, що заземлюється. Залежно від типу вводу та класу напруги його нижня частина може виконуватися як без екрана, так і з екраном для вирівнювання електричного поля.

Варто зазначити, що екрани також можуть встановлюватися на місці монтажу за допомогою гвинтів або байонетного затискача (рис. 1.23) відповідно до посібника з експлуатації, яким комплектується кожен ввід. У стандартному виконанні на екран наноситься електроізоляційне покриття порошковою фарбою з наступним запіканням завтовшки до 0,5 мм. У випадку необхідності вводи можуть комплектуватися екранами з ізоляційним паперовим покриттям завтовшки до 12 мм. В цьому

випадку екран транспортується в упаковці вводу в окремому бачку, заповненому трансформаторним маслом.

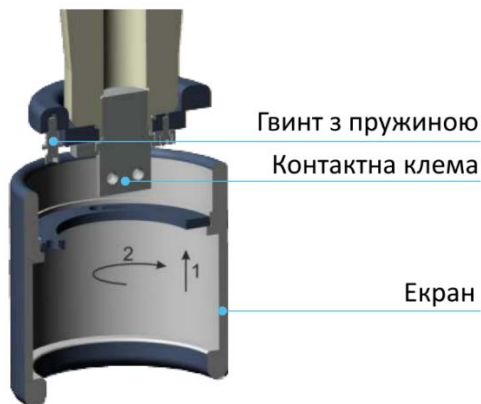


Рисунок 1.23 – Екран, закріплений байонетним затискачем

1.4 Кабельні вводи

Кабельні вводи призначені для приєднання кабельних високовольтних ліній на напруги 110, 150 та 220 кВ до комірок КРПЕ та трансформаторів.

Вводи монтуються на силовий кабель з мідною або алюмінієвою жилою та ізоляцією зі зшитого поліетилену.

Конструкція кабельного вводу:

- епоксидний ізолятор (бушинг), який залежно від виконання КРПЕ або трансформатора може комплектуватися подовжувачим адаптером;
- болтовий накінецьник зі зрив-болтами;
- силіконовий стрес-конус (рис.1.25);
- пружинний блок, що забезпечує щільне прилягання стрес-конуса до ізолятора;
- фланець, що притискає ізолятор до комірки КРПЕ;
- вузол герметизації та центрування кабелю у вводі.



Рисунок 1.24 – Кабельный ввод



Рисунок 1.25 – Стресс-конус кабельного вводу

1.5 Вводи для КРПЕ і кабельного підключення трансформаторів

Високовольтний ввід для комплектного елегазового розподільчого пристрою (КРПЕ) чи кабельного підключення трансформатора призначений для вводу або виводу високої напруги з баку електричного апарату і є прохідним ізолятором складної конструкції.

Обидва кінця такого вводу занурені у відмінне від повітря однорідне («масло – масло») чи різнорідне («масло – елегаз») ізоляційне середовище. Вводи для КРПЕ та кабельного підключення трансформаторів випускаються з твердою внутрішньою ізоляцією конденсаторного типу за технологією RIP (Resin Impregnated Paper – папір, просочений смолою) або елегазовою (SF₆) внутрішньою ізоляцією.

1.5.1 Конструкція вводу «масло – масло» для кабельного підключення трансформаторів

Ввод призначений для з'єднання відводу трансформатору з кінцевою кабельною муфтою (рис. 1.26). Ввод встановлюється таким чином, щоб його нижня частина (до опорного фланцю з'єднувальної втулки) розташовувалася в трансформаторі, а верхня – в кожусі кабельного вводу, тобто ввід працює у відмінному від повітря однорідному ізолюючому середовищі («масло – масло»). Зовнішня ізоляція в такому вводі відсутня.

Головна конструктивна частина вводу – це RIP-ізоляція з конденсаторними провідними обкладками. Така ізоляція має високу надійність і тривалий строк експлуатації завдяки низьким діелектричним втратам та рівню часткових розрядів і ізоляції, її стійкості. Ця ізоляція виключає застосування трансформаторного масла в якості ізоляційної компоненти, що значно підвищує зручність експлуатації вводів.

Вимірювальний вивід останньої зрівняльної обкладки ізоляційного остову призначений для вимірювання тангенса кута

діелектричних втрат та ємності основної ізоляції і повинен бути обов'язково заземленим в той час, коли вимірювання не проводяться.



Рисунок 1.26 – Ввод «масло» – «масло» для кабельного підключення трансформаторів

1.5.2 Конструкція вводу «масло – елегаз» з RIP-ізоляцією для КРПЕ

Ввод призначений для ізолювання струмоведучих частин в трансформаторів з прямим приєднанням до КРПЕ, тобто ввод працює у відмінному від повітря різномірному ізоляційному середовищі «масло – елегаз» (рис. 1.27).

Контактний накінецьник елегазової частини забезпечує високу герметичність від витоку газу навіть за вкрай низьких температур і є рядом ущільнюючих кілець круглого перерізу зі спеціального матеріалу, стійкого до елегазу.

З'єднувальна втулка призначена для розташування на ній опорного фланцю елегазової частини, для кріплення вводу на кожусі елегазового відсіку, опорного фланцю масляної частини для кріплення вводу на трансформаторі, вимірювального виводу і пробки отвору для випуску повітря з баку трансформатору.

Вузол герметизації масляної частини перешкоджає потраплянню трансформаторного масла всередину центральної труби вводу і є кільцевим резиновим ущільненням.

Контактний накінецьник масляної частини призначений для приєднання відводу трансформатора та виконаний у вигляді контактної пластини з двома або чотирма отворами.

Нижній екран вирівнює зовнішнє електричне поле в нижній частині вводу.

1.5.3 Конструкція введів «елегаз –повітря» з RIP-ізоляцією для КРПЕ

Ввод призначений для підключення КРПЕ до лінії електропередачі (рис.1.28). При експлуатації нижня частина вводу знаходиться всередині КРПЕ в середовищі електричного газу, а верхня – на відкритому повітрі.

Верхній контактний накінецьник служить для установки контактної клеми.

Верхній екран вирівнює зовнішнє електричне поле в верхній частині вводу.

Струмopрoвід призначений для передачі номінального струму.

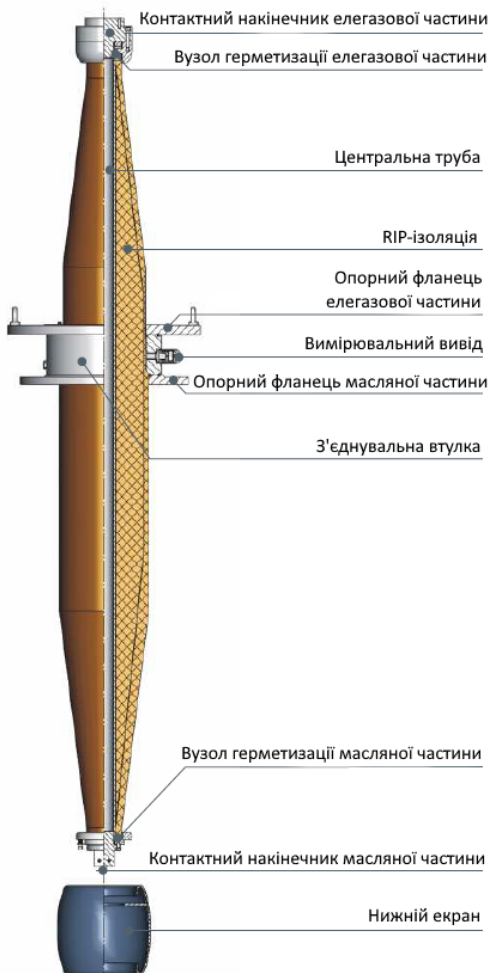


Рисунок 1.27 – Ввод «масло – елегаз» для КРПЕ



Рисунок 1.28 - Ввод «елегаз –повітря» з RIP-ізоляцією для КРПЕ

Внутрішня RIP-ізоляція з конденсаторними провідними обкладками – головна конструктивна особливість вводу.

Зовнішня фарфорова ізоляція забезпечує захист внутрішньої ізоляції від зволоження та необхідну розрядну відстані та довжину шляху витоку по зовнішній поверхні.

Сухий наповнювач – електроізоляційний гель, який захищає внутрішню порожнину вводу від зволоження.

З'єднувальна втулка призначена для розміщення на ній вимірювального виводу та опорного фланцю.

Вимірювальний вивід служить для контролю стану основної ізоляції.

Опорний фланець призначений для закріплення вводу на КРПЕ та має ущільнення між ізоляційним остовом та з'єднувальною втулкою.

Нижній контактний накінецьник служить для електричного підключення до КРПЕ.

Контрольні запитання

1. Поясніть особливості роботи внутрішньої та зовнішньої ізоляції електричних пристроїв.
2. Назвіть основні елементи конструкції конденсаторного маслонаповненого вводу.
3. З якою метою зовнішня поверхня фарфорової покривки виготовляється ребристою?
4. Яким чином здійснюється компенсація температурного розширення масла?
5. Як здійснюється герметизація вводу?
6. Як і для чого здійснюють механічну стяжку елементів вводу?
7. Які вимоги висуваються до трансформаторного масла?
8. Яка допустима максимальна величина робочої напруженості електричного поля в ізоляції остову вводу?
9. З якого матеріалу виконують центральний струмопровідний стрижень?
10. Яку роль відіграє ПВН у складі високовольтного вводу?

2. ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВВОДІВ

Високовольтні вводи на напругу 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. Зовнішньою ізоляцією таких вводитів є фарфорові покриття. Останнім часом для комплектних розподільних пристроїв випускаються вводи з елегазовою ізоляцією на напругу 110...220 кВ.

2.1 Виготовлення ізоляційного остову ізоляторів з паперово-масляною ізоляцією

Ізоляційний остов з паперово-масляною ізоляцією виготовляється шляхом намотки на струмопровідний стрижень шарів підсушеного кабельного паперу, зазвичай товщиною 70÷120 мкм, поміж якими розташовуються обкладки з алюмінієвої фольги товщиною 14 мкм, для вирівнювання електричного поля. Довжини обкладок та товщини ізоляційних шарів між ними визначаються при виконанні електричного розрахунку ізолятора та коригуються з урахуванням технологічних обмежень. Папір намотується або стрічками завширшки 120÷200 мкм врівнахльосту, або з рулону шириною, що дорівнює висоті ізоляції вводу. Спосіб намотки ізоляційного остову ізолятора зі стрічок паперу має одну перевагу: ізоляційний остов може бути виготовлений будь-якої довжини, в той час як при намотці з рулону довжина ізоляційного остову зазвичай обмежується шириною рулонів, що випускаються паперовою промисловістю (приблизно 3,5 м).

В ізоляторах з паперово-масляною ізоляцією конденсаторні обкладки виконуються, як правило, з алюмінієвої фольги. Для полегшення сушки та просякнення ізоляції доцільно застосування перфорованої фольги. За діаметру перфорованих

отворів набагато менше товщини ізоляції між обкладками, характеристики ч.р. для ізоляції з суцільною та перфорованою фольгою практично однакові, оскільки ч.р. спочатку утворюються на краях обкладок, де поле сильніше, і тому перфорація паперу не погіршує характеристик ч.р. в ізоляції.

У деяких конструкціях можливе застосування обкладок з напівпровідного паперу, що покращує умови сушки остову та зменшує рівень ч.р. на краю обкладок.

Перед намотуванням папір висушується та іноді просочується ізоляційним маслом, щоб попередити його зволоження в процесі намотки. Якщо намотка здійснюється непросоченим папером, то для попередження зволоження застосовується інфрачервоний підігрів. Намотка паперу здійснюється на станках або вручну.

На спеціальних станках ізоляційні остови вводів на напруги 110 кВ та 150 кВ намотують широким паперовим полотном безпосередньо на мідну або латунну трубу. В станку паперове полотно подається з невеликим натягом на трубу, що обертається, крізь систему сталевих валів, з яких три нагріті до температури 110 °С. Для намотування застосовується папір завтовшки 70 мкм і завширшки до 2000 мм. Електрична міцність паперу не менше 8 МВ/м, вологість не більше 7%.

При намотування через задану кількість шарів паперу закладають конденсаторні обкладки і манжети з перфорованої алюмінієвої фольги.

Намотування остова відбувається безперервно, і обкладки нічим не приклеюються, вони захоплюють полотно паперу і утримуються між шарами паперу тертям.

Крайню (фланцеву) конденсаторну обкладку виконують з мідної стрічки товщиною 0,1 мм, зверху намотують декілька шарів паперового полотна для механічного захисту намотаного остову.

Для вимірювання ємності C та тангенса кута втрат $\operatorname{tg} \delta$ до фланцевої обкладки припаюють вивід з гнучкого мідного проводу, який при зборці виводиться через фарфоровий ізолятор.

Ізоляцію остовів на напругу 220 кВ і більше намотують стрічками кабельного паперу КВМ-120 або КВУ-120 завширшки 200 мм. Паперові стрічки на бобинах попередньо висушуються в конвекційних сушилках.

Намотку виконують або безпосередньо на струмопровідний стрижень, або на бакелітовий циліндр, який потім одягають на стрижень.

При намотуванні на бакелітовий циліндр спочатку його підготовлюють. В стінках циліндра для полегшення просякнення остову свердлять отвори діаметром $10 \div 12$ мм. Отвори розташовують рівномірно по поверхні остову на відстані $200 \div 250$ мм один від одного. Задирці та нерівності на поверхні циліндра і його торцях зачищають напилком та скляним папером. Циліндр протирають уайтспіритом, поверхню вирівнюють намотуванням двох-трьох шарів паперу і потім укладають нульову обкладку, яка під час зборки поєднується зі струмопровідним стрижнем. Обкладка складається зі стрічок перфорованої алюмінієвої фольги завтовшки 14 мкм та завширшки 400 мм. Фольга укладається окремими стрічками з перекриттям 40 мм вздовж циліндра і приклеюється бакелітовим спиртовим клеєм, який наноситься пензлем ляпанцями. Кінцеві частини фольги закріплюються бандажами з мідних стрічок завтовшки 0,1 мм, до яких припаюються по три мідних гнучких провідника, що пропускаються крізь отвори в циліндрі і служать для з'єднання обкладки зі струмопровідним стрижнем.

Підготовлений циліндр встановлюють на горизонтальний намотувальний станок, на якому відбувається намотка паперових стрічок з 50%-ним перекриттям. Потім розміщують обкладку, так само, як і нульову, але без мідного бандажу. Довжина обкладки встановлюється за шаблоном. Для отримання гладенького краю

обкладки та зниження напруженості електричного поля на краю кінці алюмінієвих стрічок підгинають. Аналогічно встановлюють манжети між обкладками.

На крайню (фланцеву) обкладку приблизно посередині намотують мідну стрічку завширшки 150 мм та завтовшки 0,1 мм, кінці спаюються. Згори мідної стрічки накладають другу мідну стрічку завширшки 50 мм та завтовшки 0,3 мм з пряжкою – для щільного затягування на остові. Поверх цієї конструкції намотують декілька шарів паперової стрічки, що утворює намотку. До зовнішньої мідної стрічки для вимірювального виводу припаюється гнучкий мідний провід.

В подальшому проводять обрізку осердя та формують на ньому уступи. Розглянемо обрізане осердя (остов – рис. 2.1: 1 – несуча труба, 2 – фіксуючі остов на трубі металеві шайби, 3 – фіксуючі гетинаксові шайби, 4 – підпорні бакелітові циліндри, 5 – основні алюмінієві обкладки, 6 – манжети (додаткові обкладки)).

Для кращого уявлення обкладок і манжет масштаб по горизонталі збільшено в 10 разів по відношенню до масштабу по вертикалі. Папір на кінці уступів тимчасово фіксують кіперною стрічкою, а потім підпорними бакелітовими циліндрами і гетинаксовими шайбами, які перед розміщенням на остов обдувають повітрям, нагрітим до температури 50÷60 °С.

Нині вводи з додатковим масляним каналом між струмопровідним стрижнем і ізоляцією остова застосовуються для класів напруги вводів 220 кВ і вище при більших струмах, якщо виникають проблеми, пов'язані з тепловою стійкістю ізолятора. Для формування каналу між ізоляційним остовом і стрижнем ізоляція намотується не на стрижень, а на бакелітовий циліндр, який потім встановлюється на струмопровідний стрижень за допомогою конусних прокладок. Металеві конусні прокладки розташовуються радіально на деякій відстані один від одного і не перекривають масляний канал. Таким чином між

струмопровідним стрижнем і бакелітовим циліндром утворюється канал, по якому для охолодження і вирівнювання розподілу температури в ізоляційному остові циркулює масло.

У ввідів зі значними тепловими втратами в ізоляційному остові (750 і 1150 кВ) ізоляція розділена на внутрішню і зовнішню секції так, що між ними утворюється додатковий канал, по якому циркулюється масло і охолоджує остов. При цьому на внутрішню секцію одягається захисний бакелітовий циліндр, внутрішній діаметр якого на 60÷80 мм більше за зовнішній діаметр захисного циліндру. Зовнішня секція встановлюється за допомогою конусних прокладок так само, як і для внутрішньої секції. Остання обкладка внутрішньої секції поєднується з першою обкладкою зовнішньої.

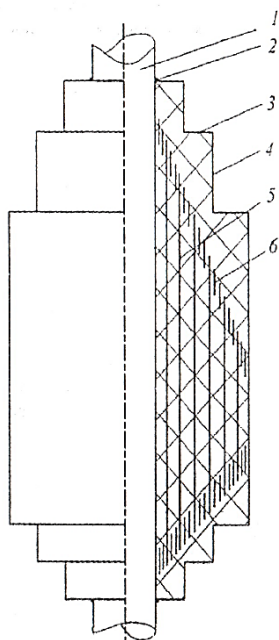


Рисунок 2.1 – Ескіз ізоляційного остову

2.2 Сушка та просякнення маслонаповнених ввідів

Сушку ізоляційних остовів проводять в вакуумних індукційних сушильних печах. Ізоляційні остови встановлюють в гільзи з нержавіючої сталі, закріплені на підлозі корпусу вакуумної печі. В стінці сталюого корпусу печі з декількома ізоляційними остовами герметично закладені малогабаритні прохідні ізолятори, крізь які приєднуються контрольно-вимірювальні прилади – термомпари для виміру температури і міст для виміру ємності. Щупи термомпар розташовуються на відстані $1,0 \div 1,5$ м від нижнього торця остову і на відстані $0,8 \div 1,0$ м від верхнього торця. Для контролю процесу сушки вимірюють тангенс кута втрат $\text{tg}\delta$ і ємність C ізоляції остова на частоті 1000 Гц. Міст приєднують до першої та останньої обкладки остова.

Перед сушкою вакуумну піч перевіряють на натікання повітря після завантаження в неї остовів, для чого в печі створюють вакуум 266,6 Па, протягом 5 хв. тиск не повинен зрости більше ніж на 1333 Па.

Сушку проводять в два етапи: перший – попереднє нагрівання без вакууму; другий – сушка під вакуумом в печі. При попередньому нагріванні остовів на напругу 500 кВ температуру підвищують до $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом $10 \div 12$ год. і витримують за цієї температури дві доби. Потім включають вакуумний насос і створюють вакуум 0,01 МПа, сушку продовжують 1-2 доби. На наступному етапі вакуум доводять до 106,6 Па і сушку проводять що 5-6 діб. Для рівномірного розподілу вологи за товщиною ізоляції проводять прогрівання протягом доби за температури $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ без вакууму, після чого тиск знову знижують до 106,6 Па і продовжують сушку протягом 1-2 діб. В подальшому включають бустерний насос і знижують тиск до 0,133 Па, сушку за такого тиску продовжують 6-8 діб. Якщо значення $\text{tg}\delta_1$ знижується до норми ($<0,005$) і тримається на такому рівні п'ять діб, сушку остову закінчують. Ємність висушеного осердя становить

(380÷400) пФ. Загальна тривалість сушки ізоляційного остова вводу на напругу 500 кВ – не менше 19 діб.

Вимірювання температури, $\text{tg}\delta_1$ і C_1 проводять до початку сушки і один раз за добу в процесі сушки. Вакуум в печі безперервно контролюють за показами вакуумметра.

Висушений ізоляційний остов одразу поступає на зборку вводу. Тривалість знаходження вводу на повітрі не повинна перевищувати 4 год. до моменту встановлення вводу на вакуумну обробку. Якщо неможливо негайно почати зборку, остов зберігають у печі за температури 60 °С без вакууму.

Сушку вводів на напругу 750 кВ проводять за таких самих температури та тиску, як було зазначено раніше, але значно довше. Тривалість їх сушки становить (28÷30) діб. Під час сушки вимірюють температуру і вакуум щогодини, $\text{tg}\delta_1$ і ємність C_1 – двічі на добу.

Вводи на напругу 110 кВ сушать за простішим графіком. Прогрівання без вакууму за температури 105 °С триває 16÷20 год., потім слідує сушка без вакууму протягом (10÷12) годин. За тиску 0,01 МПа ввод сушать (12÷16) годин, потім за тиску 400 Па – близько 4 діб. Сушку закінчують при стабілізації $\text{tg}\delta_1$ ізоляції протягом 3 діб. Загальна тривалість сушки становить (6÷7) діб.

Для попередження зволоження ізоляції зборку вводів проводять за температури не нижче 15 °С та відносній вологості повітря не вище 60%.

Далі вводи направляють на технологічну обробку, яка полягає у вакуумній обробці і заповненні ввода маслом.

Для вакуумування і заповнення вводів маслом зібрані вводи встановлюють на металеві стенди в вертикальному положенні. Вакуумну обробку кожного вводу проводять через проміжну камеру, яка представляє собою товстостінний скляний циліндр ємністю 10 л. Шлангом проміжну камеру приєднують до отвору в контактній шпильці, зазвичай закритою пробкою, а до вентилю на з'єднувальній втулці вводу – резиновий шланг, з'єднаний з

маслопроводом. При цьому вентиль повинен бути щільно закритий.

До подання масла у ввіді створюють вакуум за залишкового тиску не більше 133,3 Па (1 мм рт. ст.). Потім перевіряють ввід на натікання повітря, яке не повинне перевищувати 667 Па (5 мм рт. ст.) протягом 10 хвилин. За відсутності натікання повітря приступають до вакуумної обробки вводу, яку проводять безперервно протягом 24 годин. В процесі вакуумування залишковий тиск у ввіді підтримують на рівні 133,3 Па.

По закінченню вакуумної обробки зібраного вводу, застосовуючи вимірювальний вивід, вимірюють ємність між передостанньою і останньою конденсаторними обкладками C_1 . Потім подають дегазоване ізоляційне масло з маслопроводу, повільно відкриваючи вентиль на з'єднувальній втулці вводу. Для кращого просякнення багат шарової паперової ізоляції вводу ізоляційне масло іноді підігрівають до температури $(50 \div 60)^\circ\text{C}$.

Заливку вводу маслом проводять невеликими порціями протягом $(2,0 \div 2,5)$ годин доти, доки масло не з'явиться в проміжній камері, що приєднана до отвору контактної шпильки. При цьому ввід весь час знаходиться під вакуумом в подальшому виключають вакуум, відкривають вентиль від маслопроводу до упору і ввід просочують маслом протягом 12 годин. Потім вентиль від маслопроводу закривають і відкривають вентиль від вакуумної лінії. Вакуумування заповненого маслом вводу проводять протягом $(8 \div 10)$ годин і вимірюють ємність C_1 , яка має бути в 1,5 рази більше початкової ємності (до просочення вводу маслом): $C_1 \approx 620$ пФ для вводу на напругу 500 кВ. Якщо ємність не досягла необхідного значення, ввід додатково просочують маслом та вакуумують до досягнення номінальної ємності C_1 .

Після сушки і просякнення проводять гідравлічне випробування вводу під тиском 0,3 МПа протягом 1 години. Потім його ретельно оглядають, звертаючи особливу увагу на місця з'єднань частин вводу.

За відсутності протікання масла з вводу його промивають. Для цього масло зливають протягом 2 годин, відкривши пробку в нижньому фланці, і знову вакуумують ввід протягом (8÷10) годин. Далі за вказаною вище схемою ввід заповнюють маслом, просочують протягом не менше 12 годин і знову вакуумують протягом (8÷10) годин до встановлення і стабілізації ємності C_1 . Після цього ввід піддають електричним іспробуванням, і якщо він витримує ці випробування, то доливають в нього масло під вакуумом.

До вводів на напругу 750 кВ і більше приєднують бак тиску, призначений для компенсації теплового розширення масла. Перед приєднанням бак попередньо готують: перевіряють його герметичність і заповнюють маслом.

При підключенні баку тиску до вводу останній повинен залишатися з'єднаним з проміжною камерою, але вакуум не включають. Потім вільний кінець трубки від баку тиску підводять до вентиля на з'єднувальній втулці вводу. Далі відкривають вентиль на вводі і одночасно вентиль на баці тиску і під струменем масла, що витікає з вентиля на вводі і з трубки, яку приєднують до вентиля вводу. Вентиль на вводі закривають та відключають вод від проміжної камери.

Потім відкривають вентиль на вводі і протягом доби перевіряють систему (ввод-бак тиску) на герметичність. За відсутності протікання масла встановлюють необхідний тиск. Зазвичай тиск в системі вище необхідного (0,12 МПа при 20 °С), і тому доводиться частину масла з баку випускати крізь пробку. На завершення відкриті вентиля на вводі і баці тиску пломбують. Далі при пакуванні, транспортуванні і випробуваннях вводи від'єднувати від нього бак неможна.

Контрольні запитання

1. Як здійснюється намотка остову стрічками з кабельного паперу?

2. Навіщо ізоляцію остову вакуумують?
3. Як визначити момент закінчення сушки та просякнення?
4. Чому контроль технологічного процесу термовакuumної сушки та просякнення здійснюють за тангенсом кута діелектричних втрат та ємності?

3. ЕЛЕКТРИЧНИЙ РОЗРАХУНОК

Метою розрахунку високовольних вводів є забезпечення їхньої надійної роботи за умови різних електричних впливів. При цьому необхідно виключити можливість:

- виникнення часткових розрядів, що призводять до пробою ізоляційного остова;
- розвиток теплового пробою ізоляційного остова;
- перекриття ізоляційного остову між краями вирівнювальних обкладок;
- перекриття фарфорових покришок.

Розміри і конструкція ізоляційного остова високовольного 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.

3.1 Принципи побудови високовольного вводу конденсаторного типу

Прохідні ізолятори мають несприятливе розташування електродів, що призводить в найпростішому випадку до вкрай нерівномірного розподілу радіальної та аксіальної напруженості електричного поля біля краю фланцю 2 (рис. 3.1).

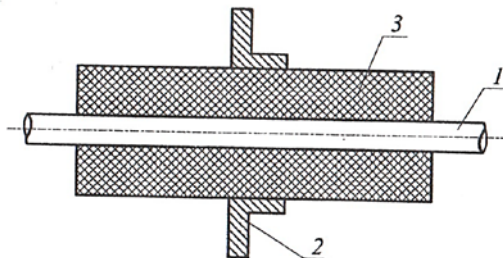


Рисунок 3.1 – Ескіз прохідного ізолятора:

1 – стрижень, 2 – фланець, 3 – ізоляція

Для побудови надійної ефективної і оптимальної конструкції вводу необхідно:

- організувати наблизений до рівномірного розподіл усередненої радіальної й аксіальної складових напруженості електричного поля;
- максимально зменшити ступінь нерівномірності електричного поля.

Дані принципи реалізуються введенням до ізоляції зрівняльних провідних обкладок таким чином, щоб ємності між сусідніми обкладками були близькі за величиною, за одночасної відповідної зміни довжини обкладок в аксіальному напрямку і зміщенні обкладок в радіальному напрямку (рис. 3.2).

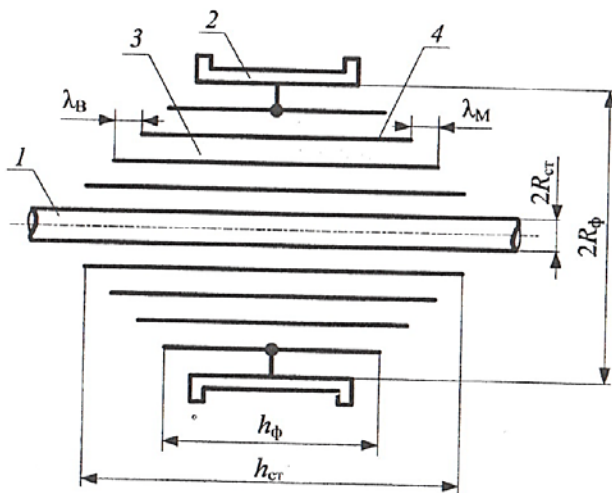


Рисунок 3.2 – Схематична реалізація принципів побудови ввідів зі зрівняльними обкладками: 1 – стрижень; 2 – фланець; 3 – ізоляція; 4 – зрівняльні обкладки; $\lambda_{\text{в}}$, $\lambda_{\text{м}}$ – довжина виступу обкладок відповідно для сторони вводу, що знаходиться в повітрі і маслі; $R_{\text{ст}}$, $R_{\text{ф}}$ – радіуси, а $h_{\text{ст}}$, $h_{\text{ф}}$ – довжини відповідно найближчої до стрижня і не поєднаної з ним обкладки і найближчої до фланцю, але гальванічно поєднаної з ним обкладкою

Розглянемо, чому зрівняльні обкладки виконуються так, щоб їх довжина рівномірно зменшувалася по мірі збільшення діаметру намотки.

3. 2 Необхідна умова взаємозв'язку розмірів зрівняльних обкладок в аксіальному і радіальному напрямках

Зробимо спрощене припущення, що зрівняльні обкладки вводу (рис. 3.3) зсунуті так, що нижні їх кінці лежать в одній площині на рівні нижнього краю з'єднувального фланцю. Тоді елементарну ємність, утворену шаром ізоляції довжиною h і радіусами $R - \Delta R$, R , нехтуючи коаксіальністю системи при $\Delta R \ll R$, визначимо як для плоскої задачі

$$C = \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot Rh}{\Delta R}, \quad (3.1)$$

де h – довжина обкладки в осьовому напрямку з радіусом R ; ε – відносна діелектрична проникність шару ізоляції товщиною ΔR .

Електричний заряд цього конденсатору:

$$q = C\Delta U = \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \Delta U}{\Delta R} = -2\pi\varepsilon\varepsilon_0 \cdot RhE_r, \quad (3.2)$$

де $E_r = -\Delta U/\Delta R$ – усереднене значення радіальної напруженості електричного поля між зрівняльними обкладками. Знак « \rightarrow » означає, що зі збільшенням R значення потенціалу на обкладках зменшується, тобто приріст потенціалу ΔU від'ємний.

Оскільки для кожного електричного конденсатора $q = \text{const}$, що випливає з теореми Остроградського-Гауса для потоку вектора електричної індукції крізь замкнену поверхню, то

$$E_r Rh = \text{const}. \quad (3.3)$$

Умова (3.3), поєднуюча радіуси і довжини зрівняльних обкладок, є необхідною умовою, яка забезпечує виконання принципів побудови конденсаторного вводу.

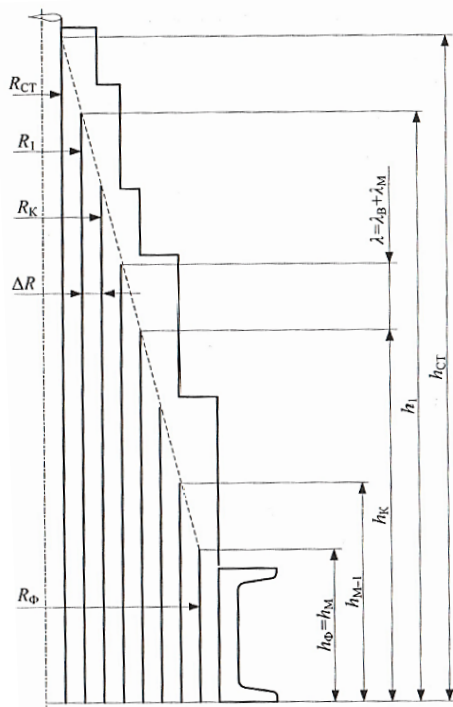


Рисунок 3.3 – Схема розташування обкладок

Якщо допустити, що кількість зрівняльних обкладок нескінченна, то падіння напруги між сусідніми обкладками визначається як:

$$dU = E_h dh = -E_r dR, \quad (3.4)$$

де E_h – приведена аксіальна напруженість електричного поля.

При виконання умови (3.3), при $E_r = \text{const}$

$$Rh = R_{\text{ст}} h_{\text{ст}} = R_{\phi} h_{\phi} = \text{const}. \quad (3.5)$$

Співвідношення між аксіальними усередненими напруженостями по поверхні ізоляції остову в верхній і нижній частинах вводу $E_{h_{\text{в}}}$ і $E_{h_{\text{н}}}$ ($E_{h_{\text{в}}} < E_{h_{\text{н}}}$) і приведеною аксіальною напруженістю E_h може бути отримане при виконанні наступних умов:

$$\Delta U = E_h \lambda = E_{h_{\text{в}}} \lambda_{\text{в}} = E_{h_{\text{н}}} \lambda_{\text{н}}, \quad (3.6)$$

де $\lambda = \lambda_{\text{в}} + \lambda_{\text{н}}$.

Після перетворень (3.6) визначаємо зв'язок між E_h , $E_{h_{\text{в}}}$ і $E_{h_{\text{н}}}$:

$$\frac{1}{E_h} = \frac{1}{E_{h_{\text{в}}}} + \frac{1}{E_{h_{\text{н}}}}. \quad (3.7)$$

Визначимо, чи змінюється і як приведена напруженість електричного поля E_h за умови сталості E_r . З виразу (3.5):

$$h = \frac{R_{\text{ст}} h_{\text{ст}}}{R}. \quad (3.8)$$

Звідки, диференціюючи ліву і праву частини виразу (3.8):

$$dh = -R_{\text{ст}} h_{\text{ст}} \frac{dR}{R^2}. \quad (3.9)$$

Тоді з (3.4) з урахуванням (3.9):

$$E_h = -E_r \frac{dR}{dh} = E_r \frac{R^2}{R_{\text{ст}} h_{\text{ст}}}. \quad (3.10)$$

З (3.10) випливає, що за $E_r = \text{const}$, E_h є змінною величиною, що набуває максимального значення біля фланцю:

$$E_{\max h} = E_r \frac{R_{\phi}^2}{R_{\text{ст}} h_{\text{ст}}}$$

і мінімального біля стрижня:

$$E_{\min h} = E_r \frac{R_{\text{ст}}}{h_{\text{ст}}}.$$

бо $R_{\phi} > R_{\text{ст}}$.

Таким чином за $E_r = \text{const}$, E_h змінюється нерівномірно, що може призвести до перекриття ізолятора по поверхні. Тому для раціонального вибору геометричних розмірів зрівняльних обкладок і вирівнювання радіальної та аксіальної напруженості поля застосовують спеціальні методи:

1) остов вводу виконується з однаковими уступами, але за різної товщини шарів між сусідніми обкладками, які обираються так, щоб отримати однакові ємності і однакові різниці потенціалів на кожному шарі;

2) остов вводу виконується з однаковою товщиною шарів, а довжини уступів обираються за умовою (2.5) $R_h = \text{const}$ з коригуванням довжини уступів на відсутність перенапруг між обкладками;

3) довжини уступів обираються однаковими за рівної товщини шарів.

3.3 Характер розподілу напруженості електричного поля в найближчій зоні біля країв зрівняльних обкладок

Оскільки введення зрівняльних обкладок практично призведе до появи ділянок ізоляції, що знаходяться в зоні дії сильного неоднорідного поля (біля країв зрівняльних обкладок),

з більш високими значеннями напруженості електричного поля, ніж в зонах слабкої неоднорідності між обкладками, то необхідно провести аналіз розподілу напруженості біля країв.

Найпростішу модель для розрахунку електричного поля біля краю зрівняльної обкладки, що лежить на кордоні двох середовищ діелектриків з діелектричними проникностями ϵ_1 і ϵ_2 , можна уявити у вигляді системи електродів «напівплощина – площині» (рис. 3.4).

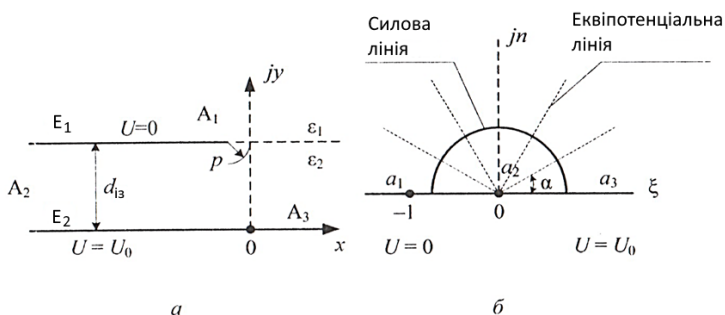


Рисунок 3.4 – Конструкція електродів для розрахунку поля біля краю зрівняльної обкладки (а) і її відображення на верхню напівплощину при $\epsilon_1 = \epsilon_2$ (б)

Вирішимо задачу для однорідного діелектрика при $\epsilon_1 = \epsilon_2$.

Верхня область напівплощини a_1, a_2, a_3 в координатах $t = j\eta + \xi$ відображується на внутрішню область багатокутника A_1, A_2, A_3 в координатах $y = x + jy$ за допомогою перетворення Кристоффеля-Шварца. Похідна перетворюючої функції має вигляд:

$$\frac{dz}{dt} = C(t - a_1)^{\phi_1 - 1} (t - a_2)^{\phi_2 - 1}, \quad (3.11)$$

де C – стала; φ_1, φ_2 – внутрішні кути багатокутника $A_1 A_2 A_3$, виражені в долях π , відповідно для вершин A_1 і A_2 ($\varphi_1 = 2, \varphi_2 = 0$); a_1 і a_2 – точки на напівплощині, що відповідають вершинам A_1 і A_2 .

Точку a_3 , що відповідає вершині A_3 , приймаємо розташованою в нескінченості. Нехай потенціал електрода $E_1 = 0$, а потенціал електрода $E_2 = U_0$. Тоді кордон напівплощини (рис. 3.4,б) за $t < 0$, буде мати потенціал 0, а при $t > 0$, буде мати потенціал $U = U_0$. Нескладно помітити, що еквіпотенціалі на верхній напівплощині будуть мати форму напівкола з центром в точці a_2 . Значення двох точок a_1 і a_2 обрано довільно ($a_1 = -1, a_2 = 0$), але так, щоб потенціал точки a_1 дорівнював нулю, і послідовність розташування точок a_1 на напівплощині відповідала послідовності обходу точок A_1 проти часової стрілки.

Тоді (3.11) перетвориться на:

$$\frac{dz}{dt} = C \left(\frac{t+1}{t} \right). \quad (3.12)$$

Після інтегрування отримуємо:

$$z = C \int \frac{t+1}{t} dt = Ct + C \ln t. \quad (3.13)$$

Сталу C знайдемо з відповідності координат точок A_2 і a_2 .

Перехід навколо точки a_2 за нескінченно малим радіусом

$t = \Delta t e^{j\alpha}$ ($\Delta t \rightarrow 0$) від $\alpha=0$ до $\alpha=\pi$ відповідає переходу навколо точки A_2 з електрода E_1 на електрод E_2 при $x \rightarrow -\infty$.

Використовуючи вираз (3.12), встановимо умову цього переходу:

$$\int_{-\infty + jd_{13}}^{-\infty + 0} dz = C \int_{\pi}^0 \frac{\Delta t e^{j\alpha} + 1}{\Delta t e^{j\alpha}} \Delta t j e^{j\alpha} d\alpha,$$

або з урахуванням того, що $\Delta t \rightarrow 0$:

$$-jd_{i3} = C \int_{\pi}^0 jd\varphi.$$

Звідки:

$$C = \frac{d_{i3}}{\pi}, \quad z = \frac{d_{i3}}{\pi}(t + \ln t). \quad (3.14)$$

Знайдемо напруженість електричного поля E_p поблизу точки A_1 ($\rho \ll d_{i3}$). Напруженість E_p відповідає напруженості електричного поля $E_{\Delta t}$ поблизу точки a_1 .

Відзначимо, що напруженість поля E_t для верхньої напівплощини (рис. 3.4, б) легко визначається як:

$$E_t = \frac{U_0}{l_c} = \frac{U_0}{\pi t}, \quad (3.15)$$

де l_c – довжина силової лінії, яка чисельно дорівнює довжині напівкола з радіусом t .

Напруженість поля в шуканій моделі:

$$E_z = \frac{dU}{dz} = \frac{dU}{dt} \cdot \frac{dt}{dz} = E_t \frac{\pi}{d_{i3}} \cdot \frac{t+1}{t} = \frac{U_0}{d_{i3}} \cdot \frac{1}{t+1}. \quad (3.16)$$

Як випливає з (3.13), точці $z_0 = -\frac{d_{i3}}{\pi} + jd_{i3}$ в координатній площині z відповідає точка $t_0 = -1$ в координатній площині t . Тоді точці $z_0 + \rho$ відповідає точка $t_0 + \Delta t$, де ρ і Δt – нескінченно малі прирости аргументів. Встановимо відповідність між ρ і Δt . З формули (3.14):

$$z_0 + \rho = \frac{d_{i3}}{\pi} [-1 + \Delta t + \ln(-1 + \Delta t)]. \quad (3.17)$$

Розкладаючи функцію $\ln(-1 + \Delta t)$ в ряд Тейлора, зневажаючи членами вищих порядків малості, отримаємо після перетворень:

$$\pi|\rho| = d_{i3} \cdot \Delta t + d_{i3} \cdot \left[-\Delta t + \frac{(\Delta t)^2}{2} \right], \quad (3.18)$$

звідки

$$\Delta t = \sqrt{\frac{2\pi|\rho|}{d_{i3}}}. \quad (3.19)$$

Підставляючи Δt в формулу (3.16), отримаємо:

$$E_p = \frac{U_0}{d_{i3}} \cdot \frac{1}{1 + (-1 + \Delta t)} = \frac{U_0}{\sqrt{2\pi|\rho|}d_{i3}}. \quad (3.20)$$

Якщо $\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2$, то значення E_p вздовж поверхні розділу середовищ складе:

$$E_p^* = E_p \sqrt{\frac{2\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}}, \quad (3.21)$$

де E_p визначається за формулою (3.20) або:

$$E_p^* = E_p \sqrt{\frac{\varepsilon_1 d_{i3}}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)\pi\rho}}, \quad (3.22)$$

де $E_r = \frac{U_0}{d_{i3}}$.

При збільшенні d_{i3} напруженість електричного поля E_p^* в рівновіддалених від краю обкладок точках збільшується прямо пропорційно $\sqrt{d_{i3}}$, що призводить до більш ранньої появи часткових розрядів в області краю обкладки (крайовий ефект) за менших значень E_r . Зі збільшенням ε_2 і зменшенням ε_1 напруженість поля E_p зменшується, що за однакової фізичної

природи руйнування ізоляції призводить до покращення роботи вводу.

Таким чином, збільшення кількості обкладок і пов'язане з цим зменшенням товщини шарів ізоляції між обкладками призводить до поліпшення розподілу електричного поля на краях обкладок. Однак через послаблені місця ізоляції під зрівняльними обкладками пробивна напруженість, починаючи з певного значення, знижується зі зменшенням цієї товщини. Тому обирають оптимальну товщину шару (за дослідними даними 1–2 мм за застосування кабельного паперу товщиною 0,08–0,12 мм).

При цьому допустима робоча напруженість $E_{r,p}$ внаслідок крайового ефекту визначається за емпіричною формулою для паперово-масляних ввідів [3]:

$$E_{r,p} \leq 4(\Delta R)^{-0,58} \text{ кВ/мм.} \quad (3.23)$$

Для паперово-бакелітових

$$E_{r,p} \leq 1,6(\Delta R)^{-0,58} \text{ кВ/мм,} \quad (3.24)$$

де ΔR – в мм, ($\Delta R \approx d_{із}$).

3.4 Розрахунок остову вводу з постійною напруженістю електричного поля ($E_h = \text{const}$, $E_r = F(R, h)$)

Оскільки для розрахунку ізоляції з постійною аксіальною напруженістю електричного поля аксіальні напруженості вздовж поверхні ізоляції в маслі і в повітрі приймаються постійними, то

$$E_h = \frac{U_{\text{розр}}}{h_{\text{ст}} - h_{\text{ф}}} = \text{const,} \quad (3.25)$$

де $U_{\text{розр}}$ – розрахункове значення напруги.

Визначимо з (3.3) E_r і підставимо в (3.4).

Тоді

$$R \cdot h \frac{dh}{dR} = \text{const} = C_1, \quad (3.26)$$

оскільки $E_h = \text{const}$.

Розділяючи змінні після інтегрування, отримаємо:

$$\frac{h^2}{2} = C_1 \ln R + C_2, \quad (3.27)$$

де C_2 – стала.

Граничні умови для визначення сталих інтегрування мають вигляд:

$$h = h_\phi; R = R_\phi$$

$$h = h_{\text{ст}}; R = R_{\text{ст}}$$

Підставивши граничні умови в (3.27) та вирішивши отриману систему рівнянь, знайдемо сталі інтегрування:

$$C_1 = \frac{h_\phi^2 - h_{\text{ст}}^2}{2 \ln \frac{R_\phi}{R_{\text{ст}}}}; \quad C_2 = \frac{h_\phi}{2} + \frac{h_\phi^2 - h_{\text{ст}}^2}{2 \ln \frac{R_\phi}{R_{\text{ст}}}} \ln R_\phi. \quad (3.28)$$

Рівняння (3.27) після підстановки сталих (3.28) приведемо до вигляду:

$$\frac{h^2 - h_\phi^2}{h_{\text{ст}}^2 - h_\phi^2} = \frac{\ln \frac{R_\phi}{R_{\text{ст}}}}{\ln \frac{R_\phi}{R_{\text{ст}}}}. \quad (3.29)$$

Дане рівняння служить основним виразом для розрахунку довжин та радіусів обкладок за постійної довжини уступів.

Радіальну напруженість знайдемо з (3.4), (3.26), (3.28):

$$E_r = E_h \frac{h_{\text{ст}}^2 - h_{\text{ф}}^2}{2 \ln \frac{R_{\text{ф}}}{R_{\text{ст}}}} \cdot \frac{1}{R_h}. \quad (3.30)$$

З формули (2.3) для крайніх обкладок приймаємо ($\varepsilon = \text{const}$):

$$R_{\text{ст}} h_{\text{ст}} E_{r\text{ст}} = R_{\text{ф}} h_{\text{ф}} E_{r\text{ф}}, \quad (3.31)$$

де $E_{r\text{ст}}$ та $E_{r\text{ф}}$ – радіальні напруженості поля в шарах біля стрижня та біля фланцю відповідно.

Звідки

$$\frac{R_{\text{ф}}}{R_{\text{ст}}} = \frac{h_{\text{ст}}}{h_{\text{ф}}} \cdot \frac{E_{r\text{ст}}}{E_{r\text{ф}}}. \quad (3.32)$$

Підставляючи в (3.30) значення E_h з (3.25) та перетворюючи, отримуємо для шару біля стрижня:

$$U_{\text{розр}} (h_{\text{ст}} + h_{\text{ф}}) = 2R_{\text{ст}} h_{\text{ст}} E_{r\text{ст}} \ln \frac{R_{\text{ф}}}{R_{\text{ст}}}, \quad (3.33)$$

або

$$U_{\text{розр}} \left(1 + \frac{h_{\text{ф}}}{h_{\text{ст}}} \right) = 2R_{\text{ст}} E_{r\text{ст}} \left(\ln \frac{h_{\text{ст}}}{h_{\text{ф}}} + \ln \alpha \right), \quad (3.34)$$

де

$$\alpha = \frac{E_{r\text{ст}}}{E_{r\text{ф}}}.$$

Якщо задані допустимі радіальні напруженості поля біля стрижня $E_{r\text{ст}}$ та біля фланця $E_{r\text{ф}}$, то рівняння (2.34) пов'язує дві

величини $h_{ст}/h_{ф}$ та $R_{ст}$. Якщо одна з них задана, то інша може бути визначена зі співвідношення:

$$R_{ст} = \frac{U_{розр} \left(1 + \frac{h_{ф}}{h_{ст}} \right)}{2 \cdot E_{rст} \left(\ln \frac{h_{ст}}{h_{ф}} + \ln \alpha \right)}. \quad (3.35)$$

Радіус фланця визначається за формулою (3.32):

$$R_{ф} = R_{ст} \frac{h_{ст}}{h_{ф}} \cdot \alpha. \quad (3.36)$$

Як витікає з (3.30), найбільше значення E_r має місце за мінімальних значень $R \cdot h$. Як показують численні розрахунки реальних конструкцій, мінімальне значення $R \cdot h$ мають місце або поблизу фланцю, або поблизу стрижня.

Приймемо, що радіальна складова напруженості поля поблизу стрижня та поблизу фланця однакова ($\alpha=1$). При цьому вона буде дорівнювати найбільшому значенню напруженості з усіх значень, можливих в шарах ізоляції. Приймемо $h_{ст}/h_{ф} = Z$. Тоді з (3.30) та з (3.32):

$$E_{r\max} = \frac{U_{розр}}{2R_{ст}h_{ст}} \cdot \frac{h_{ф} + h_{ст}}{\ln \frac{R_{ф}}{R_{ст}}}. \quad (3.37)$$

$$E_{r\max} = \frac{U_{розр}}{2R_{ф}} \cdot \frac{Z+1}{\ln Z} = \frac{U_{розр}}{2R_{ст}} \cdot \frac{Z+1}{Z \ln Z}.$$

Визначимо значення Z , за якого максимальна радіальна напруженість поля має мінімальне значення.

За незмінних $U_{розр}$ та $R_{ф}$ та вважаючи $R_{ст}$ змінною, умова мінімуму може бути визначена зі співвідношення:

$$\frac{d}{dZ} \left(\frac{Z+1}{\ln Z} \right) = 0. \quad (3.38)$$

Або після взяття похідної:

$$\ln Z - \frac{1}{Z} - 1 = 0, \quad (3.39)$$

звідки $Z = 3,6$.

Таким чином, за умовою кращого розподілу напруженості електричного поля за шарами ізоляції оптимальною конструкцією вводу є така, у якій довжини стрижня та фланцю поєднані співвідношенням:

$$h_{\phi} = \frac{h_{\text{ст}}}{Z} = \frac{h_{\text{ст}}}{3,6}. \quad (3.40)$$

Далі визначаються найвигідніші радіуси стрижня та фланцю за формулою (3.36).

Якщо конструювати ввід з умови мінімуму об'єму ізоляційних матеріалів остову вводу, вважаючи, що він має циліндричну форму, то Z має інше значення. Знайдемо його. Об'єм остову:

$$V = \pi (R_{\phi}^2 - R_{\text{ст}}^2) h_{\text{ст}} = \pi R_{\text{ст}}^2 (Z^2 - 1) h_{\text{ст}}. \quad (3.41)$$

Оскільки за умовою $E_h = \frac{U_{\text{розр}}}{h_{\text{ст}} - h_{\phi}}$, то після перетворень:

$$h_{\text{ст}} = \frac{U_{\text{розр}} \cdot Z}{E_h (Z - 1)}.$$

А з формули (3.37)

$$R_{\text{ст}} = \frac{U_{\text{розр}} \cdot (Z+1)}{2Z \cdot E_{r\text{max}} \ln Z}. \quad (3.42)$$

Підставляючи вирази для $h_{\text{ст}}$ та $R_{\text{ст}}$ в формулу (3.41) та вважаючи $U_{\text{розр}}$, $E_{r\text{max}}$, E_h сталими, отримаємо:

$$V = \frac{\pi U_{\text{розр}}^3 \cdot (Z+1)^3}{4E_h \cdot E_{r\text{max}}^2 Z (\ln Z)^2}. \quad (3.43)$$

Приврівнюючи похідну об'єму V по Z до нуля, отримаємо:

$$\frac{(2Z-1) \cdot \ln Z - 2(Z+1)}{Z^2 (\ln Z)^3} = 0, \quad (3.44)$$

звідки $Z = 4,1$.

Під час розрахунку вводу з великим струмовим навантаженням можна полегшити умови роботи найближчих до стрижня шарів ізоляції, обравши $\alpha < 1$, тобто радіальну напруженість стрижня $E_{r\text{ст}}$ прийняти меншою у порівнянні з радіальною напруженістю поблизу фланця $E_{r\text{ф}}$.

З (3.34) та (3.36) після перетворень отримаємо:

$$E_{r\text{ст}} = \frac{U_{\text{розр}} \left(1 + \frac{1}{Z}\right)}{2R_{\text{ст}} \ln(Z\alpha)} = \frac{U_{\text{розр}} (1+Z)}{2R_{\text{ф}} \ln(Z\alpha)}. \quad (3.45)$$

Для визначення мінімального значення $E_{r\text{ст}}$ приврівнюємо першу похідну $\frac{dE_{r\text{ст}}}{dZ}$ до нуля у припущенні сталості $U_{\text{розр}}$, $R_{\text{ф}}$, α .

В результаті отримаємо:

$$\ln(Z\alpha) - \frac{1}{Z} - 1 = 0. \quad (3.46)$$

Результат вирішення (3.46) при $\alpha = 0,7 - 1$ наведено на рис. 3.5.

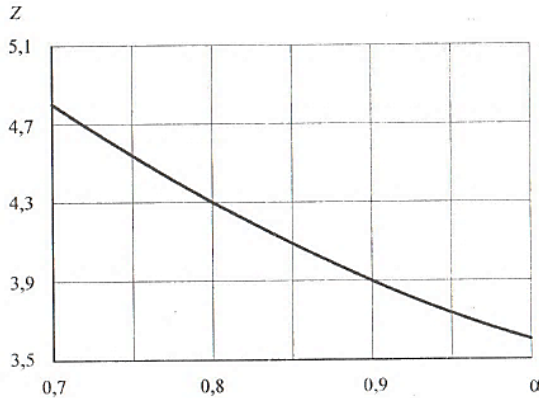


Рисунок 3.5 – Залежність $Z = f(\alpha)$

Залежно від класу напруги вводу Z приймають в межах від 3,6 до 5,0 з урахуванням технологічних допусків і з невеликим коефіцієнту запасу для забезпечення електричної міцності вздовж поверхні зовнішньої ізоляції за будь-яких погодних умов. При цьому $E_{r \max}$ змінюється незначно. Наприклад, збільшення Z від 3,6 до 4,1 підвищує $E_{r \max}$ не більше, ніж на 1%. Довжину обкладки поблизу фланця доцільно обирати при $Z = 4,1$.

Тоді

$$R_{ст} = \frac{R_{\phi}}{Z} = \frac{R_{\phi}}{4,1}. \quad (3.47)$$

Найекономічніші розміри остову знайдемо з (3.37) при $Z = 4,1$:

$$R_{\phi} = \frac{U_{розр}}{2E_{r \max}} \cdot \frac{Z+1}{\ln Z} = 1,8 \frac{U_{розр}}{E_{r \max}}, \quad (3.48)$$

де $U_{\text{розр}}$ – розрахункова напруга вводу для обраного класу напруги.

Для ізолятора з постійною аксіальною напруженістю електричного поля при $Z = h_{\text{ст}}/h_{\text{ф}}$ та $\alpha=1$ характерним є сталість співвідношень між середньою та максимальною радіальною напруженістю в найвантажнішому шарі. Дійсно, на підставі формули (3.37) при $\alpha=1$ та $h_{\text{ст}}/h_{\text{ф}} = R_{\text{ф}}/R_{\text{ст}} = 3,6$:

$$E_{r_{\text{max}}} = \frac{U_{\text{розр}}}{2R_{\text{ст}}} \cdot \frac{\left(1 + \frac{1}{3,6}\right)}{\ln(3,6)} = \frac{U_{\text{розр}}}{2R_{\text{ст}}}. \quad (3.49)$$

Середня радіальна напруженість визначається як:

$$E_{r_{\text{сеп}}} = \frac{U_{\text{розр}}}{R_{\text{ф}} - R_{\text{ст}}} = \frac{U_{\text{розр}}}{R_{\text{ст}} \left(\frac{R_{\text{ф}}}{R_{\text{ст}}} - 1\right)} = \frac{U_{\text{розр}}}{2,6R_{\text{ст}}}. \quad (3.50)$$

З виразів (3.49) і (3.50) отримуємо, що:

$$\frac{E_{r_{\text{max}}}}{E_{r_{\text{сеп}}}} = \frac{2,6}{2} = 1,3. \quad (3.51)$$

Таким чином, враховуючи (3.51), можна зробити висновок про те, що шари діелектриків виконуються неоднакової товщини. Тонкі шари розташовані поблизу фланця та поблизу стрижня, де напруженість поля максимальна, а товсті в середині остова. Оскільки в тонких шарах напруженість поля в 1,3 рази вища, ніж середня по всій товщині діелектрика між фланцем і стрижнем, то логічно припустити, що в товстих шарах посередині остову напруженість повинна бути приблизно в 1,3 рази менша, ніж середня. Тому максимальна напруженість в шарах поблизу стрижня та поблизу фланця може бути більше приблизно до $1,3^2=1,69$ разів, ніж в середніх шарах остову. Або товщина ізоляції

в середині остову в 1,69 разів перевищує товщину ізоляції поблизу фланцю та поблизу стрижня.

Таким чином, для вводу з постійною аксіальною складовою напруженості поля, за умови рівності ємностей елементарних конденсаторів, товщини шарів повинні бути неоднаковими та змінюватися у відносному виразі відповідно графіка на рис. 3.6.

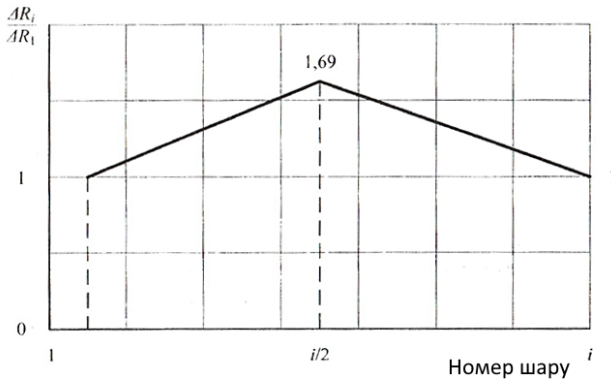


Рисунок 3.6 – Залежність AR_i / AR_1 від номеру шару i

Точніша розрахункова залежність $\Delta R_i = f(i)$ має вигляд випуклої параболі (рис. 3.7, крива 1), оскільки уточнюється пошаровим розрахунком ємностей, які нелінійно залежать від товщини шарів, обраних за рис. 3.6 в межах технологічного розкиду. Останній обумовлений необхідністю урахування реальної товщини паперової стрічки, з якої намотується ізоляційний шар. Так, наприклад, при використанні кабельного паперу товщиною 0,12 мм і намотці упівнахльосту товщина одного оберту намотки дорівнює 0,25 мм. У зв'язку з цим, розміри товщин шарів повинні бути кратні значенню 0,25 мм (рис. 3.7, крива 2). Товщини першого шару на рис. 2.7 – 3,0 мм, а середнього – 4,8 мм. Співвідношення товщин становить 1,6.

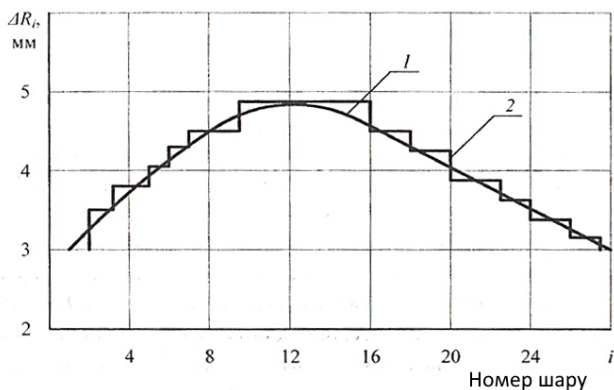


Рисунок 3.7 – Залежність ΔR_i від номеру шару i

Розглянутий варіант виконання остову високовольтного вводу має один суттєвий недолік, що полягає в ускладненні технологічної операції по намотці різновтовщинної ізоляції залежно від порядку розташування шару.

3.5 Розрахунок вводу з найменшою нерівномірністю радіальної напруженості електричного поля

В цьому випадку приймемо значення радіальної складової напруженості електричного поля постійною у всіх шарах $E_r = \text{const}$, що означає $\Delta R_i \approx \text{const}$. Оскільки розрахований за варіантом 3.1.4 остов вводу має розміри $\frac{R_\phi}{R_{\text{ст}}} = \frac{h_{\text{ст}}}{h_\phi} = 3,6$, то

варіант, що розглядається, повинен вписуватися в ті ж розміри, щоб конкурувати з попереднім варіантом.

За сталості радіальних напруженостей виникає суттєва різниця в аксіальних напруженнях поблизу стрижня та поблизу фланця, причому поблизу фланця аксіальні напруженості в основному перевищують допустимі напруженості по поверхні в маслі. Однак завжди можна підібрати таку мінімальну

нерівномірність радіальних напруженостей, за яких аксіальні напруженості ніде не перевищували допустимих значень. Оскільки з виразу (3.51) витікає, що за постійної аксіальної напруженості (перший варіант розрахунку) нерівномірність радіальних напруженостей $E_{r\max}/E_{r\text{ср}} = 1,3$, то за деякої проміжної нерівномірності радіальної напруженості, що приблизно дорівнює 1,15, може бути дотримана умова відсутності небезпечних аксіальних напруженостей.

При визначенні основних розмірів фланцю приймемо

$$E_{r\max} = 1,15E_{r\text{ср}}. \quad (3.52)$$

Враховуючи, що $E_{\text{ср}}$ визначається зі співвідношення (3.50), спираючись на (3.52) отримаємо:

$$R_{\text{ст}} = \frac{U_{\text{розр}}}{E_{r\text{ср}}(Z-1)} = \frac{U_{\text{розр}}}{2,6E_{r\max}}. \quad (3.53)$$

І далі – відповідно до формул (3.32) і (3.40) $R_{\phi} = Z R_{\text{ст}}$.

Для варіанту розрахунку, що розглядається, зазвичай приймається, що товщини всіх шарів однакові. Це спрощує технологію виготовлення таких ізоляторів. Кількість шарів визначається з рівності: $m = \frac{R_{\phi} - R_{\text{ст}}}{\Delta R}$, а радіус i -ої обкладки – з

$$R_i = R_{\text{ст}} + i\Delta R.$$

В прийнятому варіанті розрахунку необхідно досягти точного виконання співвідношення (3.5), тобто:

$$R_i h_i = R_{\phi} h_{\phi} = R_{\text{ст}} h_{\text{ст}}. \quad (3.54)$$

З (3.54) отримаємо:

$$h_i = \frac{R_\phi h_\phi}{R_i}.$$

При цьому сумарні довжини відповідних уступів в верхній і нижній частинах вводу будуть залежати від номера i (рис. 3.8, крива 1):

$$\lambda_i = h_{i-1} - h_i.$$

Зазвичай визначені таким чином довжини уступів, найближчі до фланця, не задовольняють вимогам по допустимій поздовжній напруженості в маслі.

Знайдемо мінімальну допустиму довжину уступу поблизу фланця:

$$\lambda_{\min} = \frac{\Delta U_m}{E_{\text{нд}}},$$

де ΔU_m – найбільше падіння напруги на шарі, λ_{\min} – мінімально допустима довжина поблизу фланця з однієї її сторони:

$$\Delta U_m = E_{r\max} \cdot R_{m-1} \cdot \ln \frac{R_\phi}{R_{m-1}},$$

де m – кількість зрівняльних обкладок $E_{\text{нд}} = 8 \div 10 \text{ кВ/см}$ – допустима аксіальна напруженість в маслі.

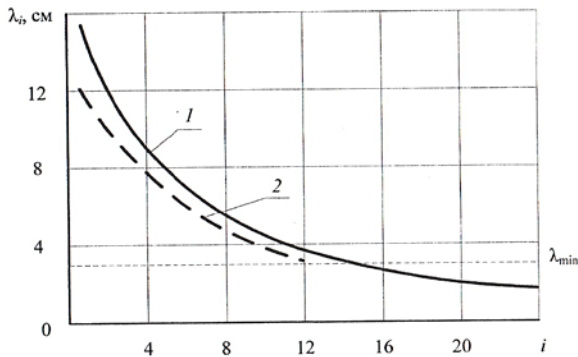


Рисунок 3.8 – Залежність довжини уступу від номеру шару

Оскільки не можуть бути допущені довжини уступів менше λ_{\min} , то залежність $\lambda_i = f(i)$ в області $\lambda_i < \lambda_{\min}$ повинна бути вимірною, а саме $\lambda_i = \lambda_{\min} = \text{const}$. При цьому бажано висоту вводу h_{ct} зберегти незмінною, бо за умови хорошого екранування фланців і обмеженої довжини зони нерівномірності внутрішньої аксіальної напруженості (під фарфоровою покришкою) розрядні напруженості по поверхні фарфору визначаються середніми розрядними напруженостями, які не відрізняються від значень першого розрахункового варіанту, для чого довжини уступів в області $\lambda_i < \lambda_{\min}$ повинні бути трохи менші, причому так, щоб зберегти попередню висоту ізолятора.

Тоді нові значення λ'_i повинні відповідати співвідношенню:

$$\sum_{i=0}^m \lambda'_i = \sum_{i=0}^m \lambda_i. \quad (3.55)$$

Відкоригована таким чином залежність $\lambda'_i = f(i)$ представлена на рис.3.8 (крива 2). Нову криву $\lambda'_i = f(i)$ при $\lambda'_i < \lambda_{\min}$ можна побудувати, враховуючи, що рівність (3.55) буде виконана, якщо площі, укладені між кривими 1 і 2 в областях $\lambda_i < \lambda_{\min}$ і $\lambda_i > \lambda_{\min}$, рівні. Після того, як визначені величини λ'_i , довжини обкладок знаходяться зі співвідношення за і $\lambda_i > \lambda_{\min}$:

$$h_i = h_c - \sum_{k=1}^j \lambda'_k. \quad (3.56)$$

Нехай j – номер обкладки, що відповідає $\lambda'_j \approx \lambda_{\min}$, тоді довжини обкладок при $i > j$ визначаються як:

$$h_i = h_{\text{ст}} - \sum_{k=1}^j \lambda'_k - (i-j)\lambda_{\text{min}}, \quad (3.57)$$

де $j \leq i \leq m$.

Для зменшення розмірів нижньої масляної частини воду всі уступи в ній робляться однаковими, рівними $\lambda_{\text{H min}}$. Тоді уступи в верхній частині:

$$\lambda_{\text{Bi}} = \lambda_i - \lambda_{\text{H min}}, \quad (3.58)$$

де $\lambda_{\text{H min}} = 0,5\lambda_{\text{min}}$.

В i -му шарі ємність між обкладками:

$$C_i = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 h_i}{\ln\left(\frac{R_i}{R_{i-1}}\right)},$$

а напруга на ньому:

$$\Delta U_i = \frac{U_{\text{розр}}}{C_i \sum_{k=1}^m \frac{1}{C_k}}.$$

Недоліком цього варіанту розрахунку є поява нерівномірного розподілу ΔU_i через коригування довжин виступів, а також ускладнення технології при організації різних довжин уступів в верхній частині вводу.

3.6 Розрахунок вводу з однаковими довжинами уступів за рівної товщини шарів ізоляції

При виконання вводу з однаковими довжинами уступів для рівномірного розподілу падіння напруги між зрівняльними

обкладками товщина шарів зміниться. Мінімальне значення товщини спостерігається в шарах поблизу фланця та поблизу стрижня, а максимальне – в середніх шарах ізоляції (розділ 3.4). Причому відношення максимальної товщини шару ізоляції до мінімальної знаходиться в межах $1,6 \div 1,69$ (рис. 3.6 та рис. 3.7).

Якщо товщину середніх шарів зменшити в 1,3 рази, а крайніх шарів поблизу стрижня та фланця збільшити в 1,3 рази і, відповідно, вирівняти товщини всіх проміжних шарів, щоб вони були однаковими, то падіння напруги перевищує падіння напруги в середніх шарах відповідно в $(1,5 \div 1,6)$ разів, а радіальна напруженість електричного поля в крайніх шарах перевищує середню в 1,3 рази, а в середніх стане в 1,15 разів менше середньої. За умови збереження рівності уступів також стане неоднаковою аксіальна складова напруженості вздовж поверхні ізоляції (більше в 1,3 рази поблизу стрижня та фланця) і менше в 1,15 рази в середній частині остову.

Таким чином спрощення технології (рівні товщини шарів і рівні уступи зрівняльних обкладок) обертається нерівномірністю як радіальної напруженості електричного поля, так і аксіальної. Така конструкція вводу потребує ретельного аналізу за оцінкою електричної міцності.

В порівнянні з конструкцією (розділ 3.4), де аксіальна напруженість поля стала, а максимальна радіальна напруженість хоча і вище середньої також в 1,3 рази, для крайніх шарів ізоляції поблизу стрижня та фланця, де товщина шару в 1,3 рази менше середньої, конструкція, що розглядається, є менш надійною.

Приймемо в якості основного варіанту розрахунки розділу 3.4.

3.7 Визначення кількості шарів ізоляції обкладок

Кількість шарів ізоляції m і кількість обкладок в ізоляційному остові визначаємо, виходячи з умови відсутності ковзаючих розрядів вздовж поверхні ізоляції остову і явищ

іонізації в паперово-масляній ізоляції, тобто напруга, прикладена до шару ізоляції, повинна бути меншою від напруги появи ковзаючих розрядів $U_{\text{ковз}}$:

$$\frac{U_{\text{розр}}}{m} \leq U_{\text{ковз}}, \quad (3.59)$$

$$U_{\text{розр}} = (1,1 \div 1,15) U_c, \quad (3.60)$$

де U_c – сухорозрядна напруга вводу.

Для паперово-масляної ізоляції напруга початку ковзаючих розрядів для i -го шару визначається за формулою:

$$U_{\text{ковз}} = 74 \sqrt{\frac{r_i \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}{\epsilon_r}}, \quad (3.61)$$

де r_i, r_{i-1} – радіуси суміжних обкладок, см; $U_{\text{ковз}}$ – в кВ; ϵ_r – відносна діелектрична проникність матеріалу шару.

Виходячи з формули (3.61), може бути визначена оптимальна кількість шарів ізоляції між зрівняльними обкладками остову:

$$m = 1,82 \cdot 10^{-4} \cdot U_{\text{розр}} \cdot E_{r \text{ max}} \cdot \epsilon_r, \quad (3.62)$$

де $E_{r \text{ max}}$ визначається за (3.37) і не повинна перевищувати $(8 \div 9) \cdot 10^6$ В/м.

При зміні щільності кабельного паперу, що застосовується при намотці остову вводу, від $0,88 \text{ г/см}^3$ ($\delta_n=0,12$ мм, К120) до $1,1 \text{ г/см}^3$ ($\delta_n=0,17$ мм, КВМ170) відносна діелектрична проникність ϵ_r змінюється від 3,65 до 4,50 відповідно.

Зі збільшенням кількості зрівняльних обкладок зменшується товщина шару ізоляції, електричне поле стає більш рівномірним і електрична міцність шару зростає. Однак за невеликої товщини шару збільшується вірогідність співпадіння дефектів в паперів,

що може викликати пробій. Тому рекомендується приймати мінімальну товщину шару порядку $2,1 \div 2,2$ мм.

В таблиці 3.1 наведено рекомендовано кількість обкладок для вводів на класи напруги 110–500 кВ.

Таблиця 3.1 – Рекомендована кількість обкладок

Клас напруги U_n , кВ	Кількість зрівняльних обкладок, од.	Кількість обкладок n	
		основних	додаткових
110	20	20	–
150	30	30	–
220	40	10	30
330	60	20	40
500	90	30	60

Внаслідок крайового ефекту напруженість електричного поля має найбільше значення на краях обкладок остову. В середній частині між обкладками поле однорідніше. Враховуючи, що електрична міцність діелектрика в середній частині між обкладками значно вища, ніж на краях обкладок, знайдена кількість зрівняльних обкладок n поділяється на два типи обкладок: «основні» зрівняльні обкладки, виконані на всю розрахункову довжину, і «додаткові» зрівняльні обкладки, які виконуються обмеженою довжиною, але більшою за довжину уступів.

3.8 Вибір довжини обкладок остову вводу

Визначення довжини обкладок починаємо з визначення довжини з'єднувальної втулки вводу (з'єднувального фланцю) l_f , яка визначається з урахуванням висоту струмоведучих елементів, розташованих на кришці трансформатору. При $U_n = 110$ кВ вона становить порядку 300 мм, 220 кВ – (400÷600) мм, 330 кВ – (600÷800) мм, 500 кВ – (800÷1000) мм.

Довжина остову вводу дорівнює сумі довжин уступів і довжині заземленої обкладки:

$$h_{\text{ст}} = \sum_{i=1}^m (\lambda_{\text{м}} + \lambda_{\text{в}})_i + h_{\text{ф}}, \quad (3.63)$$

де сумування за i йде від 1 до m , де m – кількість ізоляційних шарів, а i – кількість зрівняльних обкладок, включаючи стрижень і фланець $m+1$.

Замінивши в останньому виразі $h_{\text{ст}}$ з (3.41), отримаємо для довжини зрівняльної обкладки поблизу фланця:

$$\begin{aligned} h_{\text{ф}} &= h_{\text{ст}} - \sum_{i=1}^m (\lambda_{\text{м}} + \lambda_{\text{в}})_i = \frac{Z \cdot \sum_{i=1}^m (\lambda_{\text{м}} + \lambda_{\text{в}})_i}{Z-1} - \\ &- \sum_{i=1}^m (\lambda_{\text{м}} + \lambda_{\text{в}})_i = \sum_{i=1}^m (\lambda_{\text{м}} + \lambda_{\text{в}})_i \cdot \left(\frac{Z}{Z-1} - 1 \right) \quad (3.64) \\ &= \frac{\sum_{i=1}^m (\lambda_{\text{м}} + \lambda_{\text{в}})}{Z-1}. \end{aligned}$$

Оскільки $(\lambda_{\text{м}} + \lambda_{\text{в}})_i$ однакове за будь-якого значення i , то (3.64) спрощується:

$$h_{\text{ф}} = \frac{m \cdot (\lambda_{\text{м}} + \lambda_{\text{в}})}{Z-1}. \quad (3.65)$$

Довжина j -ої обкладки рахуючи від струмоведучого стрижня:

$$h_j = h_{\text{ст}} - \sum_{i=1}^j (\lambda_{\text{м}} + \lambda_{\text{в}})_i. \quad (3.66)$$

Після підстановки h_{ct} в (3.66), отримаємо:

$$h_j = \frac{Z \cdot \sum_{i=1}^m (\lambda_M + \lambda_B)_i}{Z-1} - \sum_{i=1}^j (\lambda_M + \lambda_B)_i. \quad (3.67)$$

За умови $(\lambda_M + \lambda_B)_i = \text{const}$:

$$\begin{aligned} h_j &= \frac{mZ \cdot (\lambda_M + \lambda_B)}{Z-1} - j(\lambda_M + \lambda_B) = \\ &= (\lambda_M + \lambda_B) \cdot \left(\frac{mZ}{Z-1} - j \right). \end{aligned} \quad (3.68)$$

3.9 Розміри уступів обкладок остову вводу

Уступи між обкладками тієї частини вводу, яка знаходиться всередині корпусу електричного апарату λ_M , обирають такої довжини, щоб перекритті по ньому відбувалося за напруги, перевищуючої розрахункову напругу вводу.

Розрахункова напруга вводу є функцією його довжини, товщини ізоляційного остову та ізоляційних властивостей масла.

$$U_{\text{роз}} = k_p \sqrt{0,1 + 100\delta + 317\lambda_M \sqrt{100\delta}} \cdot 10^3, \quad (3.69)$$

де $U_{\text{роз}}$ – напруга розряду в маслі вздовж уступу довжиною λ_M , В; δ – товщина шару ізоляції, м; λ_M – довжина уступу ізоляції в маслі між кінцями сусідніх зрівняльних обкладок зі сторони нижньої частини вводу, яка знаходиться в корпусі електричного апарату, м; k_p – коефіцієнт, $k_p = 14$ для уступу, що знаходиться в маслі.

З (3.69) визначимо λ_m :

$$\lambda_m = \frac{5,1 \cdot 10^{-9} \cdot U_{\text{роз}}^2 - 100\delta - 0,1}{317\sqrt{100\delta}}. \quad (3.70)$$

Середня товщина шару:

$$\delta = \frac{U_{\text{роз}}}{E_{rc} \cdot m},$$

де $E_{rc} = (8 \div 9)$ кВ/мм, допустима радіальна напруженість поля в шарі ізоляції.

Після підстановки значень δ , E_{rc} та $U_{\text{роз}} = \frac{U_{\text{розр}}}{m} \cdot k$, в (3.70),

отримаємо:

$$\lambda_m = \frac{5,1 \cdot 10^{-9} \cdot k^2 \left(\frac{U_{\text{розр}}}{m} \right) - \frac{100U_{\text{розр}}}{mE_{rc}} - 0,1}{100\sqrt{\frac{10^2 U_{\text{розр}}}{mE_{rc}}}}, \quad (3.71)$$

де $k = 1,2 \div 1,6$.

Сума довжин уступів, що знаходяться в маслі:

$$\sum_{i=1}^m \lambda_{M_i} = m\lambda_m. \quad (3.72)$$

Перевіримо, чи задовольняє знайдене значення умові:

$$E_{ам} \leq \frac{U_{\text{розр}}}{\sum_{i=1}^m \lambda_{M_i}} \leq 1,25 \cdot 10^6 \text{ В/м},$$

де $E_{a,m}$ – допустима аксіальна напруженість електричного поля ізоляційного шару поблизу струмопровідної труби, яка знаходиться в маслі.

Якщо ця умова не виконується, то сума довжин уступів:

$$\sum_{i=1}^m \lambda_i = \frac{U_{\text{розр}}}{1,25 \cdot 10^6}. \quad (3.73)$$

Розмір по поверхні частини вводу, що знаходиться в повітрі ззовні корпусу електричного апарату вважають знайденим, якщо витримана умова:

$$E_{aB} \leq \frac{U_{\text{розр}}}{\sum_{i=1}^m \lambda_{B_i}} \leq 0,55 \cdot 10^6 \text{ В/м} \quad (3.74)$$

де E_{aB} – допустима напруженість електричного поля вздовж поверхні діелектрика в повітрі.

Якщо ця умова до виконується, то сума довжин уступів

$\sum_{i=1}^m \lambda_{B_i}$ визначається як:

$$\sum_{i=1}^m \lambda_{B_i} = \frac{U_{\text{розр}}}{0,55 \cdot 10^6}. \quad (3.75)$$

Повна сума довжин уступів остову вводу:

$$\sum_{i=1}^m \lambda_i = \sum_{i=1}^m (\lambda_M + \lambda_B)_i = m(\lambda_M + \lambda_B). \quad (3.76)$$

3.10 Визначення товщини ізоляційних шарів між обкладками і радіусів обкладок

Переріз струмоведучого стрижня (трубу) обирають за тривало допустим струмом навантаження. Допустима щільність струму становить $j = 1 \text{ А/мм}^2$ для номінальних струмів $I_n \leq 1000 \text{ А}$ та $j = 0,5 \text{ А/мм}^2$ – при $I_n > 1000 \text{ А}$.

Отримане значення зовнішнього радіусу стрижня або труби повинно задовольняти умові (3.47).

За дослідними даними товщину ізоляції між обкладками приймають в межах $(1 \div 3) \text{ мм}$. Повна товщина ізоляції остову дорівнює $(R_\phi - R_{ст})$.

За сталого значення аксіальної напруженості довжини уступів між шарами будуть однаковими. В цьому випадку товщина ізоляції між обкладками буде неоднаковою. Поблизу стрижня та фланця товщина ізоляції між обкладками найменша. В середніх шарах ізоляції остову навпаки. Оскільки напруга за шарами розподіляється рівномірно, то

$$E_{r\text{ср}} \Delta R_{\text{ср}} = E_{r\text{max}} \Delta R_{\text{min}} = E_{r\text{min}} \Delta R_{\text{max}}, \quad (3.77)$$

де $E_{r\text{ср}} = 8 \text{ МВ/м}$ – середня напруженість електричного поля за товщиною ізоляції остову між стрижнем і фланцем; $E_{r\text{max}}$ – визначається за (3.37), а $E_{r\text{min}}$ за (3.30) при $R = (R_\phi + R_{ст})/2$, та

$$h = h_\phi + \frac{\sum_{i=1}^m (\lambda_m + \lambda_b)_i}{2} = h_\phi + 0,5m(\lambda_m + \lambda_b).$$

Тоді (рис. 3.6 та рис. 3.7):

$$\frac{E_{r\text{max}}}{E_{r\text{min}}} = \frac{\Delta R_{\text{max}}}{\Delta R_{\text{min}}} \approx 1,6 - 1,69; \quad (3.78)$$

$$E_{r\text{сеп}} = \frac{U_{\text{розр}}}{R_{\phi} - R_{\text{ст}}} = \frac{U_{\text{розр}}}{\sum_{i=1}^m \Delta R_i}. \quad (3.79)$$

З (3.78) та (3.79) отримаємо:

$$\Delta R_{\text{min}} = \frac{E_{r\text{сеп}} \Delta R_{\text{сеп}}}{E_{r\text{max}}} = \frac{U_{\text{розр}}}{R_{\phi} - R_{\text{ст}}} \cdot \frac{\Delta R_{\text{сеп}}}{E_{r\text{max}}}. \quad (3.80)$$

Радіуси обкладок можна знайти, скориставшись рівнянням (3.29):

$$\ln \frac{R_{\phi}}{R} = \frac{h^2 - h_{\phi}^2}{h_{\text{ст}}^2 - h_{\phi}^2} \ln Z, \quad (3.81)$$

підставляючи замість h довжини проміжних обкладок $h_1, h_2, h_3, \dots, h_{\phi}$.

Товщина першого ізоляційного шару від стрижня

$$\Delta R_1 = R_1 - R_{\text{ст}},$$

другого $\Delta R_2 = R_2 - R_1$ тощо.

Внутрішній діаметр з'єднувального фланцю:

$$d_{\phi} = 1,15 \cdot d_{\text{остову}} = 2,3R_{\phi} \quad (3.82)$$

обирається, виходячи з необхідності створення масляного каналу між фланцем і остовом вводу.

3.11 Оцінка ресурсу конденсаторних конструкцій за концепцією «напруженого об'єму»

Основні передумови і припущення, застосовані під час розгляду феноменологічної теорії руйнування конденсаторних конструкцій, такі:

1. Основною концепцією теорії є положення про зворотну залежність строку служби ізоляції та об'єму ізоляції V , в якому напруженість поля має підвищенні значення, і яка має вигляд:

$$M \approx \frac{1}{V}, \quad (3.83)$$

де V – так званий «напружений об'єм».

2. «Напружений об'єм» є характеристикою твердої або комбінованої (твердої, просоченої рідкими діелектриками) внутрішньої ізоляції конденсаторних конструкцій. В твердій і комбінованій ізоляції за підвищених напруженостей поля внаслідок ЧР та інших процесів руйнування відбуваються незворотні зміни структури діелектрика в «напружених об'ємах». Погіршуються електроізоляційні властивості внутрішньої ізоляції в «напружених об'ємах», які в кінцевому рахунку визначають строк служби конденсаторів.

3. Конденсаторні конструкції є протяжними системами електродів (обкладок). Тому «напружений об'єм» з підвищеним значенням напруженості поля характеризуються площею поперечного перерізу в напрямку від одного електроду до іншого і довжиною електроду, утворюючого область неоднорідного поля. Перша складова має фізичний характер, друга – статистичний. За незмінної довжини периметру електродів зміна об'єму ізоляції з підвищеним градієнтом поля, при варіюванні останнього, буде залежати тільки від площі поперечного перерізу цього об'єму. Тому при розгляді систем протяжних електродів (конденсаторів, кабелів тощо) об'єктом розрахунків умовно приймається об'єм на одиницю довжини контуру електроду, який чисельно дорівнює

площі поперечного перерізу цього об'єму в площині, перпендикулярній напрямку довжини контуру.

4. В якості величини підвищеного градієнту, визначаючої розміри «напруженого об'єму», приймаємо деяке критичне значення $E_{кр}$. Тоді «напружений об'єм» – це такий об'єм ізоляції, в якому напруженість поля перевищує значення $E_{кр}$. Для конденсаторних конструкцій зі округленими кромками значення $E_{кр}$ обирається рівним $(0,8 \div 0,95)$ максимального значення E_{max} на поверхні електродів. Для конденсаторних конструкцій з ламаними кромками, у вершинах яких $E_{max} \rightarrow \infty$, значення $E_{кр}$ не може бути меншим середньої напруженості в проміжку і більше короточасної міцності ізоляції.

5. Для розглянутої моделі краю обкладки величина «напруженого об'єму» з урахуванням формул (3.20) та (3.83) (рис. 3.4, а) дорівнює

$$V = 2\pi\rho^2 = \left(\frac{E_0}{E_{кр}}\right)^4 \frac{d_{із}^2}{4\pi}, \quad (3.84)$$

а ресурс буде обернено пропорційним робочій напруженості електричного поля в четвертому ступені та товщині ізоляції в квадраті:

$$M \approx \frac{1}{V} \approx E_0^{-4} d_{із}^{-2}. \quad (3.85)$$

В загальному випадку

$$M \sim E_0^{-m} d_{із}^{-\beta}. \quad (3.86)$$

Значення показників ступені з урахуванням реальної товщини і форми краю обкладки в формулі (3.86) відповідно становлять – $(4 \div 8)$ і – $(2 \div 3)$. Наприклад, для вводу конденсаторного типу ресурс крайніх шарів ізоляції (поблизу стрижня та фланцю) менше ресурсу середніх шарів в $1,69^{6-2}=8,15$

разів (на зменшення ресурсу впливає збільшення напруженні поля, а на збільшення ресурсу – зменшення товщини обкладки в 1,69 рази (рис. 3.6) при середньому значення показника ступеня (-6) при E_0 в формулі (3.86) та (-2) при d_{i3}).

Контрольні запитання

1. Поясніть особливості роботи внутрішньої та зовнішньої ізоляції електричних пристроїв.
2. Яким електричним навантаженням піддається ізоляція в процесі експлуатації?
3. Електричний розрахунок. Визначення потенціалу та напруженості електричного поля.
4. Що таке коефіцієнт неоднорідності електричного поля?
5. Аналітичні розрахунки полів. Теорема Гауса, рішення диференційного рівняння Лапласа для найпростіших полів.
6. Поясніть принцип конформних відображень.
7. Наведіть приклад розрахунку електричного поля за допомогою інтеграла Кристоффеля-Шварца.
8. Навіщо грабують ізоляцію?
9. Як співвідносяться радіуси струмопровідного стрижня та фланцю високовольтного конденсаторного вводу з точки зору найефективнішої конструкції, що забезпечує найкращий розподіл електричного поля.
10. Які види внутрішньої ізоляції високовольтних вводів Ви знаєте?

4. ВИБІР РОЗМІРІВ ФАРФОРОВИХ ПОКРИШОК

Поздовжні розміри фарфорових покришок (рис. 4.1) обираються на підставі залежностей розрядної напруги від розмірів розрядних відстаней по повітрю і поребрення зовнішньої поверхні ізолятора, що забезпечує достатню довжину шляху витoku вздовж зовнішньої поверхні ізолятора, а також в маслі з урахуванням коефіцієнту запасу. Під розрядною відстанню покришок розуміють мінімальну відстань по повітрю (у світлі) між верхнім екраном і середнім фланцем, тобто висота верхньої частини ізолятора H_v (рис. 4.1). Значення H_v – це зазвичай значення висоти фарфорової покришки. Воно може бути обране за допомогою дослідної кривої (рис. 4.2). На рис. 4.1 позначено H_n – висота нижньої частини ізолятора, h_n – сумарна довжина уступів обкладок в нижній частині остову вводу, H_ϕ – висота фланцю, h_ϕ – довжина зовнішньої обкладки остова, гальванічно поєднаної з фланцем, h_v – сумарна довжина уступів обкладок у верхній частині остову вводу, $h_{ст}$ – довжина найближчої до стрижня обкладки. Для відстаней, знайдених за цією кривою, необхідно ввести коефіцієнт запасу $1,10 \div 1,15$. Відповідно до рис. 4.2 аксіальна напруженість по фарфору у повітрі при розрахункових напругах до 1000 кВ може бути прийнята $3,0 \div 3,5$ кВ/см. Окрім того, висота верхньої частини ізолятора H_v визначається брудорозрядними характеристиками. При цьому значення H_v залежить від умов експлуатації – від ступеня забрудненості атмосфери.

Для України за відсутності сильних забруднень атмосфери (поблизу хімічних виробництв, теплових електростанцій і теплоелектроцентралей) значення H_v може бути оцінено за емпіричною формулою:

$$H_v = 0,868 \cdot U_n,$$

де H_v виражено в сантиметрах (см), а U_n – в кіловольтах (кВ).

Висоту верхньої покритишки H_v знаходять за середніми значеннями напруженості, що витримується, та заданої в технічному завданні, при різних видах впливу напруженості обирають найбільшу.

При прикладенні напруги в сухому стані:

$$H_g = \frac{1,3 \cdot U_c}{E_c}, \quad (4.1)$$

При прикладенні напруги під дощем:

$$H_g = \frac{1,3 \cdot U_d}{E_d}, \quad (4.2)$$

При впливі імпульсів грозових перенапруг:

$$H_g = \frac{1,1 \cdot U_{\text{імп}}}{E_{\text{п.хв}}}, \quad (4.3)$$

де U_c , U_d , $U_{\text{імп}}$ – обираються залежно від номінальної напруги відповідно до ГОСТ 1516.3-96 (табл. 4.1).

$E_{\text{імп}}$ – градієнти напруг, прийняті під час розрахунку довжини покритишки ($E_{\text{імп}} = E_{\text{п.хв}}$ – при впливі повної хвилі грозової напруги, $E_{\text{імп}} = E_{\text{з.хв}}$ – при впливі зрізаної хвилі грозової напруги).

$$E_c = (0,30 \div 0,33) \text{ МВ/м},$$

$$E_d = (0,21 \div 0,23) \text{ МВ/м},$$

$$E_{\text{п.хв.}} = (0,50 \div 0,60) \text{ МВ/м},$$

$$E_{\text{з.хв.}} = (0,75 \div 0,90) \text{ МВ/м}.$$

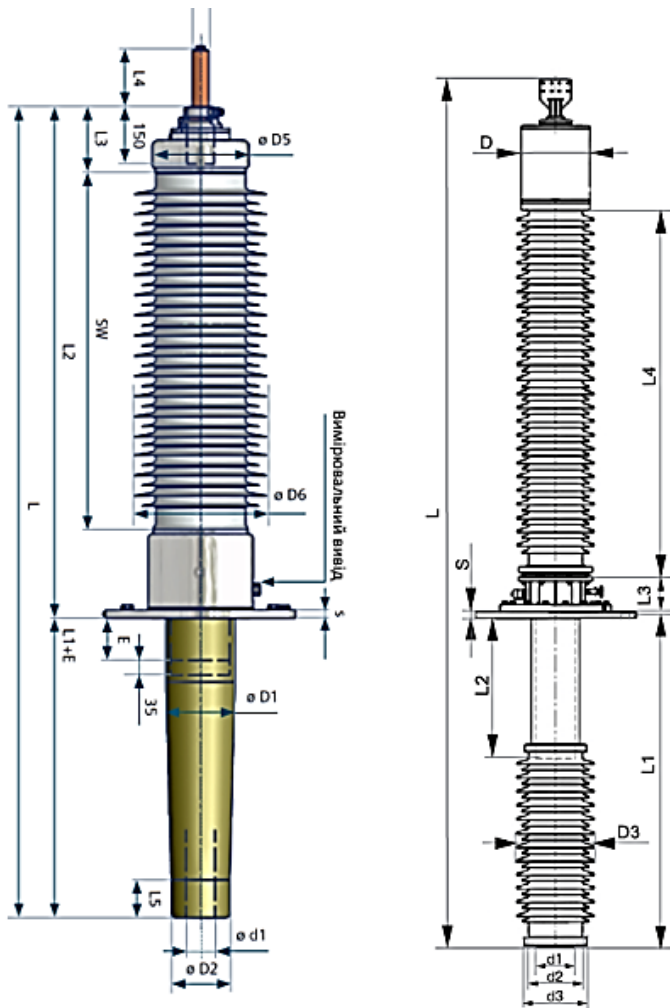


Рисунок 4.1 – Ескіз ізолятора з позначеннями поздовжніх розмірів

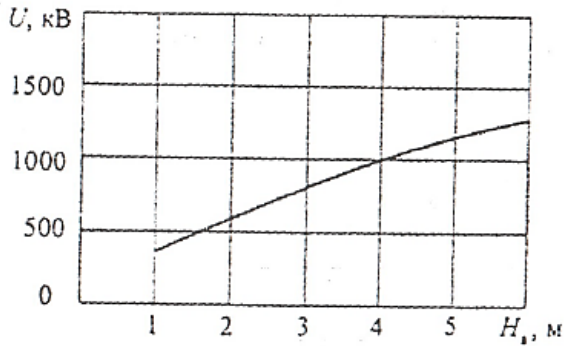


Рисунок 4.2 – Залежність розрядної напруги зовнішньої ізоляції від відстані

Таблиця 4.1 – Випробувальні напруги внутрішньої та зовнішньої ізоляції

Клас напруги, кВ	Рівень ізоляції	Випробувальна напруга, діюче значення, кВ
35	а ₁	80
35	б ₁	95*/80*
110	–	230
150	–	275
220	–	395
330	а	460
330	б	510/560***
500	а	830
500	б	680/760***
750	а	830
750	б	950

Примітки: а₁ – паперово-масляна та лита ізоляція, що працює з вимогою перевірки на відсутність часткових розрядів; б₁ – паперово-масляна та лита ізоляція без вимоги перевірки на часткові розряди; а – паперово-масляна і лита ізоляція за умови застосування ОПН для її захисту; б – паперово-масляна і лита ізоляція за умови застосування вертикальних розрядників для її захисту; * – в сухому стані; ** – під дощем; *** – для виробів з немасляною ізоляцією без перевірки якості ізоляції на відсутність часткових розрядів.

Висота верхньої фарфорової покришки повинна бути на (30÷40)% довше, ніж верхня частина остову вводу:

$$H_B = (1,3 \div 1,4) \cdot h_B. \quad (4.4)$$

Нижня покришка, що знаходиться в маслі, приймається на (20÷30)% довше нижньої частини остову вводу:

$$H_H = (1,2 \div 1,3) \cdot h_B. \quad (4.5)$$

Щоб електричний розряд не міг пройти по поверхні покришки, зануреної в масло, необхідним є виконання умови:

$$H_H \geq \frac{U_c}{E_M}, \quad (4.6)$$

де E_M – градієнт напруги перекриття нижньої покришки в маслі вздовж її поверхні, $E_M = (0,80 \div 1,25)$ МВ/м.

Товщина фарфорового тіла рубашки не перевищує (40÷45) мм. Кількість ребер на верхній покришці можна визначити за формулою:

$$N = 1,5 + 0,065 \cdot U_H, \quad (4.7)$$

де U_H – номінальна напруга вводу, кВ.

Для ізолятора без нижньої фарфорової покришки (наприклад, коли нижня частина занурюється в масло трансформатора) довжина ізоляції та довжина нижньої частини вводу H_H пов'язані співвідношенням:

$$h_H = (0,85 \div 0,9) \cdot H_H. \quad (4.8)$$

Контрольні запитання

1. Що є довжиною шляху витоку?

2. Поясніть особливості роботи зовнішньої та внутрішньої ізоляції електричних пристроїв.
3. Яких електричних навантажень зазнає ізоляція в процесі експлуатації?
4. Вплив оточуючого середовища на експлуатаційні характеристики ізоляції.
5. Дайте визначення термінам: номінальна напруга, сухорозрядна, під дощем, імпульсна, грозова та внутрішня перенапруга.
6. Чим відрізняється повний грозовий імпульс напруги від зрізаного?
7. Як відрізняються напруженості перекриття по поверхні ізоляції в повітрі і маслі?

5. РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНОЇ МІЦНОСТІ ПОКРИШКИ ВВОДУ

В процесі експлуатації верхня покоришка вводу піддається механічним впливам сили тяжіння підвідних проводів, вітровим навантаженням, власної ваги і впливу електродинамічних сил (рис. 5.1).

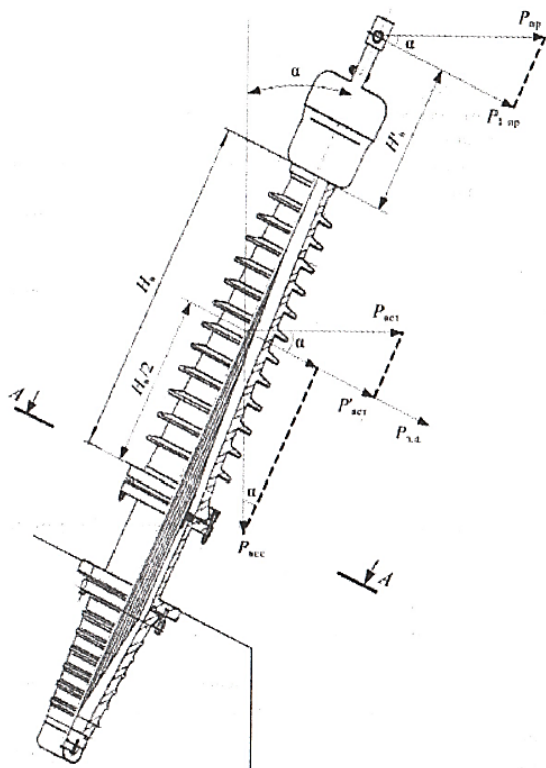


Рисунок 5.1 – Сили, що діють на верхню покоришку вводу:
 $P_{\text{віт}}$ – вітрове навантаження, $P_{\text{пр}}$ – сила тяжіння підвідних проводів, $P_{\text{ваг}}$ – сила тяжіння верхньої частини вводу, $P_{\text{е.д.}}$ – електродинамічні сили

Електродинамічні сили становлять найбільшу небезпеку в режимі короткого замикання, коли сила взаємодії між сусідніми вводами зростає в декілька разів у порівнянні з нормальним режимом експлуатації.

Найбільша напруга виникає в місці кріплення покришки зі з'єднувальним фланцем, а переріз покришки, що проходить по верхній торцевій поверхні з'єднувального фланцю, є найнебезпечнішим.

На рис. 5.1 представлений найнебезпечніший варіант одночасної дії механічних навантажень, коли напрямки дії сил вітрового навантаження, електродинамічної, тяжіння підвідних проводів співпадають (вектори лежать в одній площині). Причому проєкції цих сил, розташовані перпендикулярно осі вводу, лежать в одній площині з найбільшою проєкцією сили тяжіння верхньої частини вводу і всі направлені в одну сторону перпендикулярно осі вводу. Результуючі вектору сил вітрового навантаження, електродинамічної, сили тяжіння верхньої частини вводу прикладені до середньої верхньої частини вводу на відстані $H_B/2$, а сили тяжіння підвідних проводів на відстані H_B .

Методика механічного розрахунку

Розрахунок проводиться в такій послідовності:

- 1) визначаємо сили, що діють на покришку вводу;
- 2) визначаємо вигинаючі моменти в небезпечному перерізі, від кожної з сил;
- 3) визначаємо момент опору небезпечному перерізу;
- 4) обчислюємо напругу в небезпечному перерізі.

$$\sigma_{\text{виг}} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{W}, \quad (5.1)$$

де $\sum_{i=1}^n M_i$ – сумарний вигинаючий момент, Нм; W – момент опору, м³.

З деяким наближенням можна вважати, що в небезпечному перерізі вигинаючий момент створює частину ваги вводу, що складається з ваги струмоведучого стрижня з паперово-масляною ізоляцією, трансформаторного масла, ваги фарфорової покришки, елементів кріплення і герметизації покришки.

Вага верхньої частини вводу:

$$P_{\text{ваг}} = (m_{\text{ст}} + m_{\text{м}} + m_{\text{ф}} + m_{\text{ПМІ}}) \cdot g, \quad (5.2)$$

де $m_{\text{ст}}+m_{\text{м}}+m_{\text{ф}}+m_{\text{ПМІ}}$ – маса відповідно стрижня, масла, фарфорової покришки з елементами кріплення і герметизації, ізоляції остову верхньої частини вводу; g – прискорення вільного падіння.

Під час розрахунку ваги можна скористатися довідковими даними [19]. В цьому випадку $P_{\text{ваг}} = 0,7 P_{\text{в дов}}$, де $P_{\text{в дов}}$ – вага всього вводу.

Сила вітру, що впливає на верхню частину вводу, визначається як:

$$P_{\text{віт}} = k_a \cdot S_b \cdot \frac{V_b^2}{16}, \quad (5.2)$$

де k_a – коефіцієнт аеродинамічності конструкції верхньої покришки, $k_a = 0,7$; S_b – площа поперечного перерізу покришки, м²; V_b – швидкість вітру, м/с.

Вага алюмінієвих проводів прольоту від вводу до траверси визначається номінальним струмом I_n вводу, допустимою щільністю струму j_n . За довжини прольоту $l_{\text{проводу}}$ вагу проводу можна визначити як (одночасно це є і силою тяжіння проводів):

$$P_{\text{пр}} = \gamma \cdot \frac{I_n}{j_n} \cdot l_{\text{проводу}}, \quad (5.4)$$

де γ – питома вага проводу (для алюмінієвого проводу $\gamma = 2,7$ г/см³); j_n – допустима щільність струму.

При протіканні струмів короткого замикання i_y (А) сусідні вводи піддаються ударним електродинамічним навантаженням. В небезпечних перерізах верхньої покритишки вводу можуть виникати напруги, що перевищують допустимі напруги вигину. При протіканні струмів в протилежному напрямку вводи будуть взаємодіяти з силою (Н)

$$P_{\text{с.д.}} = -2,04 \cdot k_k \cdot i_y^2 \cdot \frac{l}{a} \cdot 10^{-7}, \quad (5.5)$$

де k_k – коефіцієнт контуру, що враховує геометричні розміри струмоведучого стрижня і провідних струмовідводів, а також їх розташування. Знак «−» вказує на дію між проводами сил відштовхування. Для провідників однакової довжини і паралельно розташованих в одній площині

$$k_k = \left(\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l} \right)^2} \right)^{-1},$$

де l – довжина частини вводу і підвідних проводів, що взаємодіють один з одним; a – відстань між осями струмовідводів, мінімальні значення яких наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Норми ізоляційних відстаней у повітрі між струмопровідними частинами прохідних ізоляторів

Клас напруги вводу, кВ	6	10	15	35	110	150	220
Допустима відстань у світлі, мм	80	110	150	300	840	1175	1700

Електродинамічні сили визначаються при протікання повного струму короткого замикання, який визначається як

$$i_y = k_y \cdot \sqrt{2} I_n, \quad (5.6)$$

де $k_y = (1,85 \div 3)$ – ударний коефіцієнт.

Сумарний вигинаючий момент дорівнюватиме сумі проєкцій сил на перпендикулярний напрям до плеча $H_v/2$ відносно небезпечного перерізу 1-1 (силу ваги $P_{\text{ваг}}$ визначасмо як власну вагу вводу):

$$\sum M_i = M_{\text{ваг}} + M_{\text{віт}} + M_{\text{в.пр.}} + M_{\text{є.д.}}, \quad (5.7)$$

де
$$M_{\text{ваг}} = \frac{1}{2} P_{\text{ваг}} \cdot H_v \cdot \sin \alpha;$$

$$M_{\text{віт}} = \frac{1}{2} P_{\text{віт}} \cdot H_v \cdot \cos \alpha;$$

$$M_{\text{в.пр.}} = \frac{1}{2} P_{\text{пр}} \cdot H_v \cdot \cos \alpha;$$

$$M_{\text{є.д.}} = \frac{P_{\text{є.д.}}}{2} \cdot H_v;$$

α – кут встановлення вводу, що відраховується від вертикалі.

Момент опору в небезпечному перерізі 1-1 визначаємо як момент опору кільця:

$$W_{1-1} = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{D_1^4 - d_1^4}{D_1} = 0,1 \frac{D_1^4 - d_1^4}{D_1}, \quad (5.8)$$

де d_1 – внутрішній діаметр покритки в перерізі 1-1, мм

$$d_1 = d_{\text{ост}} + \Delta_m + 20,$$

де $d_{\text{ост}}$ – діаметр паперово-масляного остову; Δ_m – подвійна товщина масляного каналу між остовом і з'єднувальним фланцем; D_1 – зовнішній діаметр покритки в небезпечному перерізі

$$D_1 = d_1 + 2\Delta_\phi,$$

де $\Delta_\phi = (50 \div 60)$ мм – товщина стінки покритки в перерізі 1-1.

Обчислене значення $\sigma_{\text{виг}}$ за (5.1) не повинне перевищувати допустиму величину $\sigma_{\text{вр}}$.

Для випадку, коли покритки не армовані до кріпильного фланцю:

$$\sigma_{\text{вр}} = 2,43 \cdot 10^6 \cdot S^{-0,377}, \quad (5.9)$$

де S – площа перерізу 1-1, м²; $\sigma_{\text{вр}}$ – в Па.

При вигині для армованого фарфору з цементною закладкою

$$\sigma_{\text{вр}} = 1,07 \cdot 10^6 \cdot S^{-0,418}, \quad (5.10)$$

$$S = 0,785(D_1^2 - d_1^2).$$

На рис. 5.2 зображені варіанти механічного кріплення покришок до металевому корпусу електротехнічного пристрою.

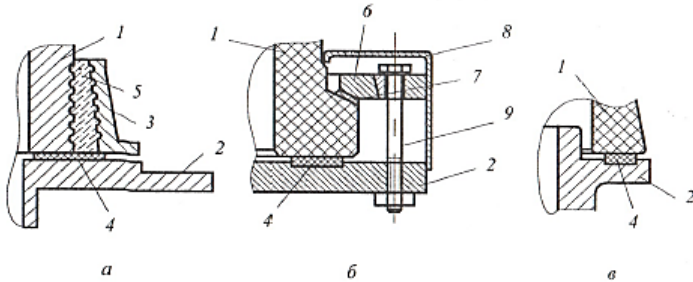


Рисунок 5.2 – Способи з'єднання фарфорових покришок
маслонаповнених вводів:

а – фланцеве; б – механічне; в – безфланцеве;

1 – верхня покришка; 2 – з'єднувальна втулка; 3 – фланець;

4 і 7 – резинові прокладки; 5 – армуючий шов; 6 – мале натискне кільце; 8 – велике натискне кільце.

Контрольні запитання

1. Які механічні зусилля діють на високовольний ввід?
2. Назвіть порядок механічного розрахунку.
3. Що є кінцевою метою механічного розрахунку?
4. Що є найкритичнішим показником при проведенні розрахунку?

6. РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВОЇ СТІЙКОСТІ ПРОХІДНОГО ІЗОЛЯТОРА КОНДЕНСАТОРНОГО ТИПУ

Тепловий пробій остова вводу є можливим, оскільки ізоляція остова має провідність і під впливом електричного поля в ній виникають діелектричні втрати, які збільшуються зі зростанням температури.

Зростання провідності та діелектричних втрат під час розігріву діелектрика протікаючим крізь нього струмом 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.

6.1. Наближений розрахунок теплової стійкості

На першому етапі проектування проводимо наближений розрахунок теплової стійкості, тобто стійкості прохідного ізолятора до теплового пробою графоаналітичним методом.

Послідовність розрахунку наступна. Ізоляція розділяється на ряд концентричних шарів, для кожного з яких визначається різниця температур з урахуванням тепла, яке виділяється в струмоведучому стрижні і в об'ємі ізоляції.

Розрахункову схему ізоляції наведено на рис. 6.1.

Приймаємо наступні припущення: тепло відводиться в оточуюче середовище тільки в радіальному напрямку, розрахунок тепловіддачі проводиться на одиницю довжини остову вводу.

По осі проходить струмоведучий стрижень. Його температура t_c . Задаємося рядом значень температури стрижня $t_c = 60, 70, 80$ °С, близьким до значень, за яких може наступити тепла рівновага. Для кожної з узятих розрахункових температур стрижня t_c розрахуємо проходження теплового потоку крізь усі елементи ізоляції. Для цього підрахуємо виділення тепла як в струмоведучому стрижні, так і в кожному шарі ізоляції.

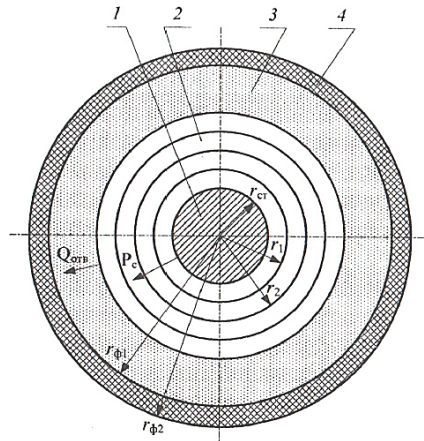


Рисунок 6.1 – Розрахункова схема теплового режиму вводу:
 1 – стрижень, 2 – ізоляційний остов, 3 – масло, 4 – фарфорова
 покривка

Послідовно сумуючи тепловий потік, що іде від стрижня, з кількістю тепла, яке виділяється в кожному шарі ізоляції, можна визначити перепад температури на границях шару, необхідний для того, щоб провести відповідний сумарний струм крізь даний шар. За цими перепадами температури знайдемо температуру зовнішньої поверхні остову вводу t_n і сумарного теплового потоку, який підводиться до зовнішньої випромінюючої поверхні.

Діаграма для розрахунку теплової стійкості показана на рис. 6.2. В нижньому квадранті будують залежність $t_n = f(t_c)$, задаючи довільно температуру стрижня за фіксованої температури оточуючого зовнішнього середовища, в верхньому – залежність тепла Q , що відводиться з зовнішньої поверхні, від температури t_n і кількості тепла P , яке виділяється в остові. Точка перетину двох графіків Q і P дозволяє визначити температуру стрижня t_c , за якої настає тепла стійкість.

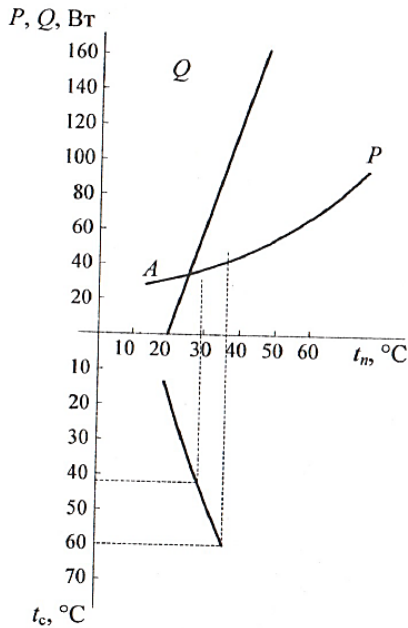


Рисунок 6.2 – Діаграма для розрахунку теплової стійкості вводу за температури зовнішнього середовища 20 °С

Кількість тепла, що виділяється в остові, складається з двох складових. Це втрати в струмоведучому стрижні

$$P_c = I_n^2 \cdot R_{\approx} \left[1 + \alpha (t_c - 20) \right], \quad (6.1)$$

де I_n – номінальний струм, А; R_{\approx} – активний опір стрижня з урахуванням поверхневого ефекту, Ом.

$$R_{\approx} = R_{\perp} \cdot \chi;$$

$$\chi \approx \frac{r_{ст}}{2} \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0 \cdot \gamma}{2}};$$

$$\omega = 2\pi f = 314, \text{ 1/с};$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}, \text{ Гн/м};$$

$$\gamma = 5,8 \cdot 10^7, \text{ См/м};$$

$$R_{\text{акт}} = \rho \frac{h_c^*}{S};$$

де ω – кутова частота змінної напруги; ρ – питомий опір, (для міді $\rho = 0,172 \cdot 10^{-7}$ Ом·м); h_c^* – повна довжина стрижня, м; S – переріз стрижня, м²; α = температурний коефіцієнт опору, для міді $\alpha = 0,0039$ 1/°C; $R_{\text{акт}}$ – активний опір стрижня на постійному струмі.

Втрати в шарі паперово-масляної ізоляції можна визначити як

$$P_{\text{Ди}} = (\Delta U)^2 \omega \cdot C_i \cdot \text{tg}\delta, \quad (6.2)$$

де ΔU – різниця потенціалів між сусідніми обкладками;

C_i – ємність шару ізоляції; $\text{tg}\delta$ – тангенс кута втрат в ізоляції.

Величина $\text{tg}\delta$ залежить від температури ізоляції. Цю залежність визначають експериментально, у багатьох випадках апроксимують виразом:

$$\text{tg}\delta = \text{tg}\delta_0 \cdot \exp \alpha_i (t_c - t_0), \quad (6.3)$$

де $\text{tg}\delta_0$ – значення $\text{tg}\delta$ за температури $t_0 = 20$ °C, ($\text{tg}\delta_0 = 0,003$); α_i – температурний коефіцієнт (0,0186 1/°C); t_c – температура стрижня.

Сумарні теплові втрати в остові вводу:

$$P = P_c + \sum_{i=1}^n P_{\text{Ди}}.$$

Якщо знехтувати впливом металевих обкладок в паперово-масляному остові і вважати, що тепло внаслідок втрат в ізоляції передається через всю товщу ізоляції в радіальному напрямку (жорсткий варіант розрахунку), то зміна температури за товщиною остову в радіальному напрямку одного метру довжини вводу складе:

$$\Delta t = P \cdot R_{\text{ПМІ}}, \quad (6.4)$$

де $R_{\text{ПМІ}}$ – тепловий опір паперово-масляної ізоляції,

$$R_{\text{ПМІ}} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{ПМІ}}} \ln \frac{r_{\text{ф}}}{r_{\text{ст}}}, \quad (6.5)$$

де $\lambda_{\text{ПМІ}}$ – теплопровідність паперово-масляної ізоляції, $\lambda_{\text{ПМІ}} = 0,25$ Вт/м·°С; $r_{\text{ф}}$ і $r_{\text{ст}}$ – радіуси фланця і стрижня відповідно.

6.2 Уточнення методики розрахунку

Для точнішого варіанту розрахунку необхідно скористатися формулою

$$\Delta t = \sum_{i=0}^n \Delta t_k, \quad (6.6)$$

де

$$\Delta t_k = \left(P + \sum_{i=1}^k P_{\text{Ди}i} \right) \cdot R_{\text{ПМІ}k},$$

$$R_{\text{ПМІ}} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{ПМІ}}} \ln \frac{r_k}{r_{k-1}},$$

r_k та r_{k-1} – зовнішній та внутрішній радіуси шару ізоляції відповідно.

Температура зовнішньої поверхні остову

$$t_{\text{п}} = t_{\text{с}} - \Delta t. \quad (6.7)$$

Проходячи крізь масляний прошарок між остовом і покришкою, потім крізь фарфорову покришку, тепловий потік досягне зовнішньої поверхні покришки і розсіється в оточуюче середовище. Тепловий потік, що відводиться з поверхні покришки в оточуюче середовище, становить

$$Q_{\text{від}} = \frac{t_{\text{п}} - t_{\text{ос}}}{R_{\text{м}} + R_{\text{ф}} + R_0}, \quad (6.8)$$

де t_{oc} – температура оточуючого фарфоровий ізолятор середовища; R_M – тепловий опір масла

$$R_M = \frac{1}{2\pi\lambda_M} \ln \frac{r_{\phi_1}}{r_{\pi}}, \quad (6.9)$$

де λ_M – теплопровідність трансформаторного масла, $\lambda_M = 0,2$ Вт/м·°С; r_{π} – радіус зовнішньої поверхні остову вводу; R_{ϕ} – тепловий опір шару фарфору

$$R_{\phi} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\phi}} \ln \frac{r_{\phi_2}}{r_{\phi_1}}, \quad (6.10)$$

де λ_{ϕ} – теплопровідність фарфору, $\lambda_{\phi} = 1,6$ Вт/м·°С; r_{π} – радіус зовнішньої поверхні остову вводу; r_{ϕ_1} , r_{ϕ_2} – радіуси внутрішньої та зовнішньої поверхні фарфорової покришки відповідно; R_0 – тепловий опір розсіяного з поверхні покришки на одиницю довжини висоти фарфорової покришки:

$$R_0 = \frac{1}{2\pi \cdot r_1 \cdot \alpha_{\phi}}, \quad (6.11)$$

де α_{ϕ} – коефіцієнт тепловіддачі фарфору у повітрі, $\alpha_{\phi} = 21$ Вт/м·°С; r_1 – радіус зовнішньої поверхні фарфорової покришки.

Побудувавши залежність P і Q від t_{π} при прийнятих значеннях температури стрижня, визначаємо t_c , за якої виконується умова теплової стійкості вводу.

Контрольні запитання

1. Назвіть складові тепловиділення в остові вводу.
2. Які припущені приймають при проведенні теплового розрахунку.
3. Перелічіть причини електричного та теплового пробою твердих діелектриків.
4. Чому порушується теплова стійкість ізоляції?
5. Як визначається тепловий опір остову?
6. Чим відрізняється приблизний та уточнений розрахунки теплової стійкості?

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Бржезицький В. О. Техніка і електрофізика високих напруг : навч. посібник / За ред. В. О. Бржезицького та В. М. Михайлова. – Харків: НТУ „ХПІ” – Торнадо, 2005. – 930 с.

2. Абрамов В. Б. Приймальні та експлуатаційні випробування електроустаткування : навч. посібник / В. Б. Абрамов, В. О. Бржезицький, О. Р. Проценко. – Київ: НТУУ «КПІ», 2015. – 235 с.

3. Гурин А. Г. Техника высоких напряжений. Расчет и конструирование электрической изоляции: учеб. пособие / А. Г. Гурин, В. В. Рудаков. – Х.: Изд-во «Підручник НТУ «ХПІ», 214. – 192 с.

4. Рубаненко О. Є. Високовольтні вводи. Конструкція, експлуатація, діагностика і ремонт : монографія / О. Є. Рубаненко, О. І. Гуменюк. – Вінниця : Вінницький національний технічний університет, 2011. – 183 с.

5. Cedric Carnal. Guarding the grid, Advanced monitoring systems protecting power lines / Cedric Carnal, Joachim Bertsch, Marek Zima // ABB Review Special Report – Power Services. – 2009. – September. – P. 38–42.

6. Мокін Б. І. Математичні моделі та інформаційно-вимірювальні системи для технічної діагностики трансформаторних вводів / Б. І. Мокін, В. В. Грабко, Дінь Тхань В’єт. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1996. – 74 с.

7. Норми випробування електрообладнання: СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. – Офіц. вид. – Київ. : ГРІФРЕ : Міністерство палива та енергетики України, 2007. – 327 с.

8. Карпов Ю. О. Теоретичні основи електротехніки. Електромагнітне поле: [підручник для студ. вищ. навч. закл.] / Ю. О. Карпов, Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 407 с.

9. Лежнюк П. Д. Використання методів нейромоделювання в оперативній діагностиці високовольтного обладнання / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І. А. Жук // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Частина 3. – 2008. – С. 75–80.

10. Василега П. О. Електропостачання : підручник / П. О. Василега. – Суми : Сумський державний університет, 2019. – 521 с.
11. Високовольтні вводи напругою від 110 кВ до 750 кВ. Типова інструкція з експлуатації СОУ 40.1-21677681-06:2009. – Офіц. вид. – Київ : Міністерство палива та енергетики України, 2009. – 70 с.
12. Козирський В. В. Електропостачання агропромислового комплексу / В. В. Козирський, В. В. Каплун, С.М. Волошин. – Київ : Аграрна освіта, 2011. – 448 с
13. Бурбело М. Й. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків / М. Й. Бурбело, О. О. Бірюков, Л. М. Мельничук. – Вінниця : Вінницький національний технічний університет, 2011. – 204 с.
14. Орлович А. Ю. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання. Навчальний посібник для напряму підготовки 6.050701 "Електроенергетика та електротехнології" / А. Ю. Орлович, П. Г. Плешков, Т. В. Величко. – Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2009. – 334 с.
15. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. – Харків : Форт, 2017. – 376 с.
16. Шестеренко В. Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств : підручник / В. Є. Шестеренко. – Вінниця: Нова книга, 2011. – 656 с.
17. Проектування систем забезпечення споживачів електричною енергією [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітніх програм «Системи забезпечення споживачів електричною енергією» та «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології» / В. А. Попов, В. В. Ткаченко, О. С. Ярмолюк. – Електронні текстові дані (1 файл: 14,5 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 222 с.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1. Високовольтні вводи. Загальні відомості.....	4
1.1 Високовольтні вводи для масляних вимикачів.....	7
1.2 Лінійні вводи.....	17
1.3 Високовольтні вводи з RIN-ізоляцією для трансформаторів та шунтуючих реакторів.....	23
1.4 Кабельні вводи.....	29
1.5 Вводи для КРПЕ і кабельного підключення трансформаторів.....	31
2. Технологія виготовлення вводів.....	37
2.1 Виготовлення ізоляційного остову ізоляторів з паперово-масляною ізоляцією.....	37
2.2 Сушка та просякнення маслонаповнених вводів.....	42
3. Електричний розрахунок.....	47
3.1 Принципи побудови високовольтного вводу конденсаторного типу.....	47
3.2 Необхідна умова взаємозв'язку розмірів зрівняльних обкладок в аксіальному і радіальному напрямках.....	49
3.3 Характер розподілу напруженості електричного поля в найближчій зоні біля країв зрівняльних обкладок.....	52
3.4 Розрахунок остову вводу з постійною напруженістю електричного поля ($E_h = \text{const}$, $E_r = F(R, h)$).....	57
3.5 Розрахунок вводу з найменшою нерівномірністю радіальної напруженості електричного поля.....	66
3.6 Розрахунок вводу з однаковими довжинами уступів за рівної товщини шарів ізоляції.....	70
3.7 Визначення кількості шарів ізоляції обкладок.....	71
3.8 Вибір довжини обкладок остову вводу.....	73
3.9 Розміри уступів обкладок остову вводу.....	75

3.10 Визначення товщини ізоляційних шарів між обкладками і радіусів обкладок.....	78
3.11 Оцінка ресурсу конденсаторних конструкцій за концепцією «напруженого об'єму».....	80
4. Вибір розмірів фарфорових покришок.....	83
5. Розрахунок механічної міцності покришки вводу	89
6. Розрахунок теплової стійкості прохідного ізолятора конденсаторного типу.....	96
6.1. Наближений розрахунок теплової стійкості.....	96
6.2 Уточнення методики розрахунку.....	100
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ.....	102
Навчальний посібник.....	106

КЕССАЄВ Олександр Геннадійович
ГОНТАР Юлія Григорівна

РОЗРАХУНОК ТА КОНСТРУЮВАННЯ
ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВВОДІВ

Навчальний посібник
для студентів денної та заочної форми навчання напряму
підготовки «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

Відповідальний за випуск КЕССАЄВ Олександр Геннадійович
Роботу до видання рекомендувала (експерт РВР) ТЮТЮНИК
Лариса Іванівна

В авторській редакції

План 2023 р., поз. 119

Підп. до друку 12.10.2023. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 2,4.
Наклад 50 прим. Зам. № _____. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017р.
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

Виготовлювач _____
