

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики

СУДНОВЕ ВИСОКОВОЛЬТНЕ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

Навчальний посібник

для підготовки бакалаврів

Спеціальність 271 «Морський та внутрішній водний транспорт»
спеціалізація 271.03 «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів
автоматики»



Одеса - 2023

DOI 10.47049/ONMU-2023-NP7

Суднове високовольтне електрообладнання.: Навчальний посібник для підготовки бакалаврів спеціальності 271 «Морський та внутрішній водний транспорт», спеціалізації 271.03 «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики». Одеса: Одеський національний морський університет, 2023– 211 с.

Укладачі: С.М. Дранчук, к.т.н., доцент, Д.Ю. Криворучко, старший викладач, Т.О. Гаур, старший викладач.

Відповідальний за випуск: завідуючий кафедрою В.О. Яровенко, д. т. н., професор

Ухвалено на засіданні Вченої ради Одеського національного морського університету протокол №12 від 31 травня 2023 року.

ЗМІСТ

Вступ	6
1. Особливості електричних мереж та судової електроенергетичної системи	10
1.1. Класифікація електричних мереж.....	10
1.2. Режими роботи нейтралів електричних мереж.....	11
1.3. Застосування електричних мереж з різними режимами роботи нейтралі на судах.....	12
1.4. Аналіз можливості застосування високовольтних електростанцій для суден з системами електроруху.....	17
Контрольні питання до розділу 1.....	24
2. Теоретичні основи техніки високих напруг	25
2.1 Електричні розряди в газовому середовищі.....	25
2.1.1 Види іонізації.....	28
2.1.2 Лавина електронів.....	31
2.1.3 Умова виникнення самостійного розряду.....	32
2.1.4 Виникнення стримеру.....	33
2.1.5 Закон Пашена.....	34
2.1.6 Розряд в неоднорідному полі.....	36
2.1.6.1 Ефект полярності	39
2.1.6.2 Бар'єрний ефект.....	40
2.1.8 Вплив часу дії напруги на пробій газової ізоляції.....	42
2.1.9. Вплив поверхні твердого діелектрика на розвиток розряду....	43
2.2 Пробій рідких діелектриків.....	48
2.2.1. Фізична природа розряду в рідких діелектриках.....	48
2.2.2 Вплив вологи та мікродомішок.....	49
2.2.3 Вплив тиску	50
2.2.4 Вплив температури.....	51
2.2.5 Вплив часу дії напруги.....	51
2.2.6 Вплив геометрії електродів, відстані між ними та полярності..	52
2.2.7 Бар'єрний ефект в рідких діелектриках.....	53
2.3 Пробій твердих діелектриків.....	54
2.3.1 Часткові розряди.....	57
2.3.2. Регулювання електричних полів у внутрішньої ізоляції.....	60
2.3.2.1 Використання багат шарових діелектриків.....	60
2.3.2.2 Використання конденсаторних обкладинок.....	61
2.3.2.3 Використання напівпровідних плівок.....	62
Контрольні питання до розділу 2.....	63
3. Високовольтна ізоляція	64
3.1. Високовольтні ізолятори.....	64
3.1.1 Лінійні ізолятори.....	64
3.1.2 Стаціонарно-апаратні ізолятори.....	65
3.2 Ізоляція високовольтних кабелів.....	68
3.3 Ізоляція високовольтних конденсаторів.....	77
3.4 Ізоляція високовольтних трансформаторів.....	78

3.5 Високовольтна ізоляція електричних машин	80
3.6 Старіння високовольтної ізоляції	82
3.6.1 Електричне старіння.....	82
3.6.2 Старіння від механічних навантажень.....	83
3.6.3. Вплив зволоження на процеси старіння.....	83
3.6.4. Теплове старіння ізоляції.....	83
3.7 Методи контролю та профілактики високовольтної ізоляції.....	85
3.7.1 Задача та мета профілактики.....	85
3.7.2 Вимірювання опору ізоляції (струмів утікання).....	86
3.7.3 Контроль вологості ізоляції за допомогою вимірювання ємності.....	89
3.7.4 Контроль ізоляції за тангенсом кута діелектричних втрат.....	91
3.7.5 Контроль ізоляції за інтенсивністю часткових розрядів.....	94
3.7.6. Контроль ізоляції підвищеною напругою.....	96
3.7.7. Моніторинг стану високовольтної ізоляції.....	97
3.7.7.1 Моніторинг теплового стану високовольтної ізоляції.....	98
3.7.7.2 Моніторинг стану високовольтної ізоляції на основі аналізу часткових розрядів	100
3.7.8. Тепловізійне обстеження високовольтного електрообладнання.....	102
Контрольні питання до розділу 3.....	103
4. Перенапруги та захист від них	106
4.1. Класифікація та характеристики перенапруг.....	106
4.2 Зовнішні перенапруги.....	107
4.3 Внутрішні перенапруги.....	108
4.4. Комутаційні перенапруги.....	110
4.4.1. Перенапруги при відключенні конденсаторів і ненавантажених високовольтних ліній.....	111
4.4.2. Перенапруги при відключенні ліній з коротким замиканням.....	114
4.4.3 Перенапруги при відключенні ненавантажених трансформаторів.....	115
4.5. Апарати для захисту від перенапруг.....	118
4.5.1. Захисні проміжки (розрядники).....	118
4.5.2. Трубочасті розрядники.....	120
4.5.3. Вентильні розрядники.....	121
4.5.4. Обмежувач перенапруг нелінійний.....	124
Контрольні питання до розділу 4.....	126
5. Суднове високовольтне електрообладнання.....	127
5.1. Вимоги до високовольтного електрообладнання на напругу вище 1000 В	127
5.1.1 Загальні вимоги.....	127
5.1.1.1 Розподіл високовольтного і низьковольтного устаткування.....	127
5.1.2 Проектування системи.....	127

5.1.2.1 Системи розподілення електричної енергії.....	127
5.1.2.2 Ступені захисту корпусів (оболонок).....	129
5.1.2.3 Ізоляційні відстані.....	130
5.1.2.4 Пристрої захисту.....	130
5.1.3 Електричні машини.....	132
5.1.3.1 Обмотки статорів генераторів.....	132
5.1.3.2 Датчики температури.....	132
5.1.3.3 Випробування.....	132
5.1.3.4 Конструкція.....	133
5.1.4 Силові трансформатори.....	134
5.1.5 Кабелі.....	135
5.1.6 Розподільні пристрої і щити управління	136
5.1.7 Розміщення.....	138
5.2 Основні конструкції суднового високовольтного обладнання.....	140
5.2.1. Комутаційна апаратура.....	140
5.2.1.1 Автоматичні вимикачі.....	143
5.2.1.2 Автоматичні вакуумні вимикачі.....	146
5.2.1.3 Автоматичні маломасильні вимикачі.....	155
5.2.1.4 Автоматичні елегазові вимикачі.....	161
5.2.1.5 Автоматичні повітряні вимикачі.....	166
5.2.2 Розподільне обладнання.....	171
Контрольні питання до розділу 5.....	178
6. Техніка безпеки при обслуговуванні високовольтного електрообладнання	180
6.1. Електричні небезпеки і заходи обережності.....	180
6.1.1 Вплив електричного струму на організм людини.....	180
6.1.2 Дуги і ударне навантаження.....	183
6.1.3 Електрозахисті засоби.....	184
6.1.4 Заземлення. Принципи і ефективність заземлення.....	189
6.1.4.1 Допустимі значення опору заземлення.....	191
6.2 Правила по високовольтній безпеці.....	192
6.2.1 Загальні положення (розділ А).....	193
6.2.2 Терміни і визначення (розділ В).....	193
6.2.3 Забезпечення безпеки при роботі з високовольтною апаратурою (Розділ С).....	195
6.2.4 Документи (Розділ D).....	200
6.2.5 Рівні повноважень (Розділ E).....	207
6.2.6 Керівництво по безпеці (Додаток 1).....	207
6.2.7 Поводження з потерпілим при електричному шоку (Додаток 2).....	208
Контрольні питання до розділу 6.....	209
Перелік літератури.....	210

ВСТУП

Навчальна дисципліна «Суднове високовольтне електрообладнання» відноситься до циклу дисциплін за освітньої – професійною програмою (ОКЗЗ), що забезпечує підготовку бакалавра з спеціальністю 141«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та спеціальністю «271.03 Річковий та морський транспорт (спеціалізації 271.03 Експлуатація суднового електрообладнання та засобів автоматики) і є обов'язковим компонентом освітньо-професійної програми підготовки бакалаврів.

Предметом дисципліни є суднове високовольтне електрообладнання, яке використовується в електрообладнанні суден. Дисципліна «Суднове високовольтне електрообладнання» є однією з основних теоретичних дисциплін, при вивченні якої студенти отримують комплекс знань, необхідних як при вивченні електрообладнання портів та суден, так і для майбутньої праці на судах та в порту.

Метою вивчення навчальної дисципліни «Суднове високовольтне електрообладнання» є: підготовка бакалавра-електромеханіка, який спроможний вирішувати складні задачі дослідження, налагодження та експлуатації сучасних високовольтних судових автоматизованих електромеханічних систем і комплексів; знання конструкції та умов експлуатації основних типів високовольтного електрообладнання; здатність вирішувати комплексні спеціалізовані задачі і практичні проблеми, пов'язані з роботою електричних систем та мереж, електричної частини станцій і підстанцій та техніки високих напруг; знання вимог нормативних актів, що стосуються інженерної діяльності, охорони праці, техніки безпеки при роботі з високовольтним електрообладнанням.

Задачею вивчення дисципліни є: уявлення о загальних положеннях теорії пробою газоподібних, рідких та твердих діелектриках; уявлення о загальних положеннях теорії вирівнювання неоднорідного електричного поля та особливостей високовольтної ізоляції суднового електрообладнання; уявлення о загальних положеннях теорії виникнення перенапруг та захисту суднового електрообладнання від перенапруг; уявлення о роботі суднового високовольтного електрообладнання в різноманітних умовах; уявлення про розподіл струму по судну, роботи різного високовольтного обладнання, режими захисту від перенапруги та коротких замикань; вміння оперативно вживати ефективні заходи в умовах надзвичайних (аварійних) ситуацій в електроенергетичних та електромеханічних системах; знати і розуміти принципи роботи електричних систем та мереж, силового обладнання електричних станцій та підстанцій, пристроїв захисного заземлення та грозозахисту та уміти використовувати їх для вирішення практичних проблем у професійній діяльності.

Внаслідок вивчення дисципліни студенти повинні знати: теоретичні основи техніки високих напруг; основні властивості різного суднового високовольтного обладнання, галузі раціонального застосування кожного з них; призначення, структуру і принципи побудови високовольтних судових

електроенергетичних систем; устрій, принцип дії та правила технічної експлуатації електричних систем, розподільних щитів, електродвигунів, генераторів, а також електросистем та обладнання змінного та постійного струму; систем автоматики та управління головною руховою установкою та допоміжними механізмами; навігаційного обладнання на містку та систем суднового зв'язку; електричних, електронних систем та систем управління палубними механізмами та вантажопідйомним обладнанням; систем управління та безпеки побутового обладнання; критерії і розрахункові умови вибору і перевірки високовольтих елементів; теоретичні основи метрології та електричних вимірювань, принципи роботи пристроїв автоматичного керування, релейного захисту та автоматики, мати навички здійснення відповідних вимірювань і використання; вимоги нормативних актів, що стосуються охорони праці, техніки безпеки та виробничої санітарії; вимоги безпеки для роботи з судновими електричними системами та навички з безпечного відключення електричного обладнання; умінь виявляти несправності в електричних ланцюгах, встановлювати місця несправностей і застосовувати заходи щодо запобігання ушкоджень.

Ці знання дозволять забезпечити підготовку бакалаврів за спеціальністю 141«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за наступними спеціальними компетенціями:

K13. Здатність вирішувати комплексні спеціалізовані задачі і практичні проблеми, пов'язані з роботою електричних систем та мереж, електричної частини станцій і підстанцій та техніки високих напруг;

K18. Здатність виконувати професійні обов'язки із дотриманням вимог правил техніки безпеки, охорони праці, виробничої санітарії та охорони навколишнього середовища;

K21. Здатність оперативно вживати ефективні заходи в умовах надзвичайних (аварійних) ситуацій в електроенергетичних та електромеханічних системах;

K26. Здатність здійснювати експлуатацію та технічне обслуговування силових систем з напругою більше ніж 1000 вольт.

У результаті успішного завершення курсу особа, якій присвоюється кваліфікація бакалавра за спеціальністю 141«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» отримує наступні результати навчання:

ПР02. Знати і розуміти теоретичні основи метрології та електричних вимірювань, принципи роботи пристроїв автоматичного керування, релейного захисту та автоматики, мати навички здійснення відповідних вимірювань і використання;

ПР07. Здійснювати аналіз процесів в електроенергетичному, електротехнічному та електромеханічному обладнанні, відповідних комплексах і системах;

ПР12. Розуміти основні принципи і завдання технічної та екологічної безпеки об'єктів електротехніки та електромеханіки, враховувати їх при прийнятті рішень;

ПР17. Розв'язувати складні спеціалізовані задачі з проектування і технічного обслуговування електромеханічних систем, електроустаткування електричних станцій, підстанцій, систем та мереж;

ПР22. Знання устрою, принципу дії та правил технічної експлуатації електричних систем, розподільних щитів, електродвигунів, генераторів, а також електросистем та обладнання змінного та постійного струму; систем автоматики та управління головною руховою установкою та допоміжними механізмами; навігаційного обладнання на містку та систем суднового зв'язку; електричних, електронних систем та систем управління палубними механізмами та вантажопідйомним обладнанням; систем управління та безпеки побутового обладнання;

ПР23. Знання вимог безпеки для роботи з судновими електричними системами та навички з безпечного відключення електричного обладнання; уміння виявляти несправності в електричних ланцюгах, встановлювати місця несправностей і застосовувати заходи щодо запобігання ушкоджень.

Знання дисципліни «Суднове високовольтне електрообладнання» дозволять забезпечити підготовку бакалаврів за спеціальністю «271.03 Річковий та морський транспорт (спеціалізації 271.03 Експлуатація суднового електрообладнання та засобів автоматики) за наступними спеціальними компетенціями:

СК1. Здатність здійснювати нагляд за експлуатацією електричних і електронних систем, а також систем управління.

СК3. Здатність здійснювати експлуатацію генераторів та систем розподілу електроенергії.

СК4. Здатність здійснювати експлуатацію та технічне обслуговування силових систем з напругою більше ніж 1000 вольт.

СК6. Здатність здійснювати технічне обслуговування та ремонт електричного та електронного обладнання.

СК11. Усвідомлення відповідальності та здатність до прийняття рішень у непередбачуваних та аварійних ситуаціях, пов'язаних з експлуатацією суднового електричного та електронного обладнання.

СК12. Здатність розв'язувати складні непередбачувані задачі і проблеми експлуатації суднових електроенергетичних установок та обладнання.

СК13. Критичне осмислення основних теорій, принципів, методів і понять сучасної морської інженерії та електротехніки.

СК14. Здатність збирати та інтерпретувати інформацію, обирати методи та інструментальні засоби для розв'язання складних професійних задач у сфері електротехніки, електромеханіки, електроніки, автоматики та морської інженерії.

СК15. Здатність обґрунтовувати власну точку зору та висновки, використовуючи основні теорії та концепції у сфері електротехніки та морської інженерії.

СК16. Здатність до аналізу та прогнозування процесів та стану суднового електрообладнання в умовах неповної або обмеженої інформації.

СК19. Здатність здійснювати нагляд за експлуатацією суднових перетворювачів електроенергії та систем управління.

У результаті успішного завершення курсу особа, якій присвоюється кваліфікація бакалавра за спеціальністю «271.03 Річковий та морський транспорт (спеціалізації 271.03 Експлуатація суднового електрообладнання та засобів автоматики) отримує наступні результати навчання:

РН1. Знання та розуміння електротехнології та теорії електричних машин; основ електроніки та силової електроніки; конструкції та принципу дії електричних розподільних щитів та електрообладнання; основ автоматики, автоматичних систем та технології управління; приладів, сигналізації та систем стеження; електроприводу; технології електричних матеріалів; електрогідравлічних та електропневматичних систем управління.

РН5. Уміння здійснювати з'єднання, розподіл навантаження та перехід з одного генератора на інший, з'єднання та роз'єднання розподільних щитів і розподільних пультів.

РН6. Знання технології високої напруги, засобів та процедур з безпеки; уміння здійснювати безпечну експлуатацію та технічне обслуговування високовольтних систем; знання процедур видачі персоналу дозволу на роботу з високовольтним обладнанням.

РН10. Знання устрою, принципу дії та правил технічної експлуатації електричних систем, розподільних щитів, електродвигунів, генераторів, а також електросистем та обладнання змінного та постійного струму.

РН16. Уміння виявляти несправності в електричних ланцюгах, встановлювати місця несправностей і застосовувати заходи щодо запобігання ушкоджень.

РН19. Розуміння електричних та простих електронних схем, перевірка, виявлення несправностей та технічне обслуговування, а також відновлення електричного та електронного контрольного обладнання до робочого стану.

РН22. Уміння виконувати безпечні процедури технічного обслуговування та ремонту.

РН33. Знання основ розподілу електроенергії між генераторними агрегатами, розуміння принципу сумісної роботи систем розподілу активного та реактивного навантаження, уміння виявляти несправності в системах розподілу електроенергії.

Розділи 1-4 дисципліни «Суднове високовольтне електрообладнання» написані доцентом С.М. Дранчуком, розділи 5 і 6 написані старшими викладачами Д.Ю. Криворучко., Т.О. Гаур, обома авторами, обсягом не менше ніж півтора авторських аркуша на кожного.

1. ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ТА СУДОВОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ

1.1. Класифікація електричних мереж.

Електрична мережа - сукупність електроустановок для передачі і розподілу електричної енергії, що складається з підстанцій, розподільних пристроїв, струмопроводів, повітряних і кабельних ліній електропередачі, що працюють на певній території

Електроустановка - сукупність машин, апаратів, ліній і допоміжного устаткування (разом із спорудами і приміщеннями, в яких вони встановлені), призначених для виробництва, перетворення, трансформації, передачі, розподілу електричної енергії і перетворення її в інші види енергії.

Діюча електроустановка - електроустановка або її частина, яка знаходиться під напругою, або на яку напруга може бути подана включенням комутаційних апаратів

За величиною номінальної напруги мережі підрозділяються:

- - мережі низької напруги (до 1000 В);
- - мережі середньої напруги (3, 6, 10, 35 кВ);
- - мережі високої напруги (110, 220 кВ);
- - мережі надвисокої напруги (330, 500, 750 кВ);
- - мережі ультрависокої напруги (вище 1150 кВ).

По роду струму мережі підрозділяються:

- - мережі постійного струму;
- - мережі змінного струму.

По конструктивному виконанню мережі діляться:

- - на повітряні;
- - кабельні;
- - струмопроводи промислових підприємств;
- - проводки усередині будівель і споруд.

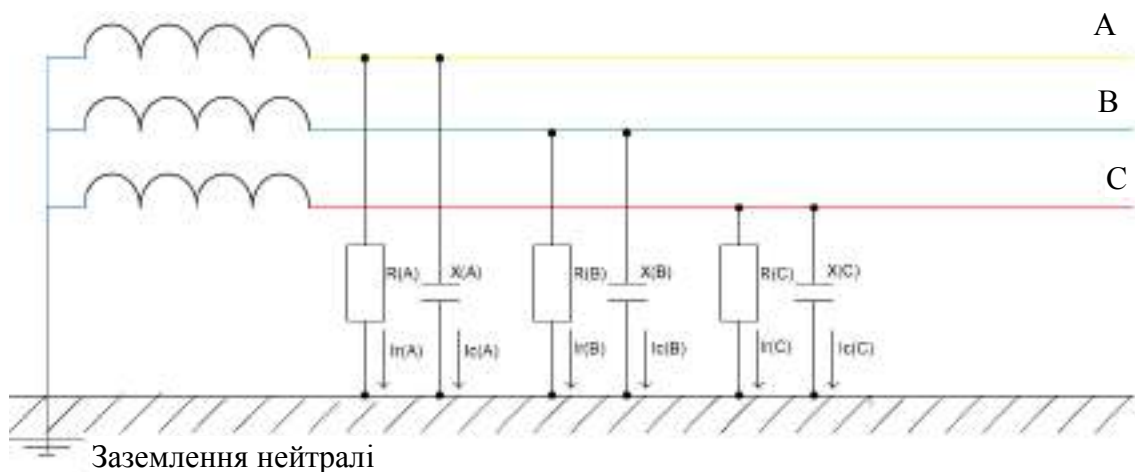


Рис.1.1 Електрична мережа з глухо заземленою нейтраллю

1.2. Режими роботи нейтралів електричних мереж

Нейтралі трансформаторів трифазної мережі можуть бути:

- заземлені безпосередньо;
- заземлені через індуктивні опір;
- ізольовані від землі.

Якщо нейтраль обмотки трансформатора приєднана к пристрою безпосередньо або через малий опір, то така нейтраль називається - **глухо заземленою**, а мережі, які приєднанні до цієї обмотки - мережами з **глухо заземленою нейтраллю** (рис.1.1).

Якщо нейтраль яка не приєднана до заземлюючого пристрою або приєднана до нього через трансформатори напруги, називається - **ізольованою**, а мережі, які працюють з такою нейтраллю - **мережами з ізольованою нейтраллю** (рис.1.2)

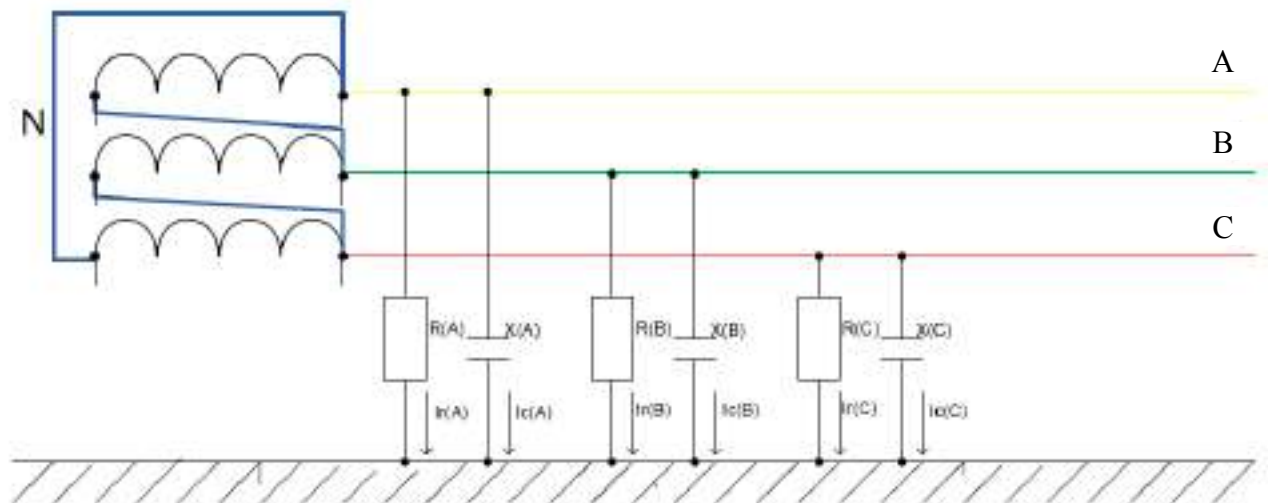


Рис.1.2 Електрична мережа з ізольованою нейтраллю

Мережі, нейтраль яких заземлена через налагоджені індуктивні опори, що компенсують ємнісний струм мережі, називають - мережами з **компенсованою нейтраллю** (рис.1.3)

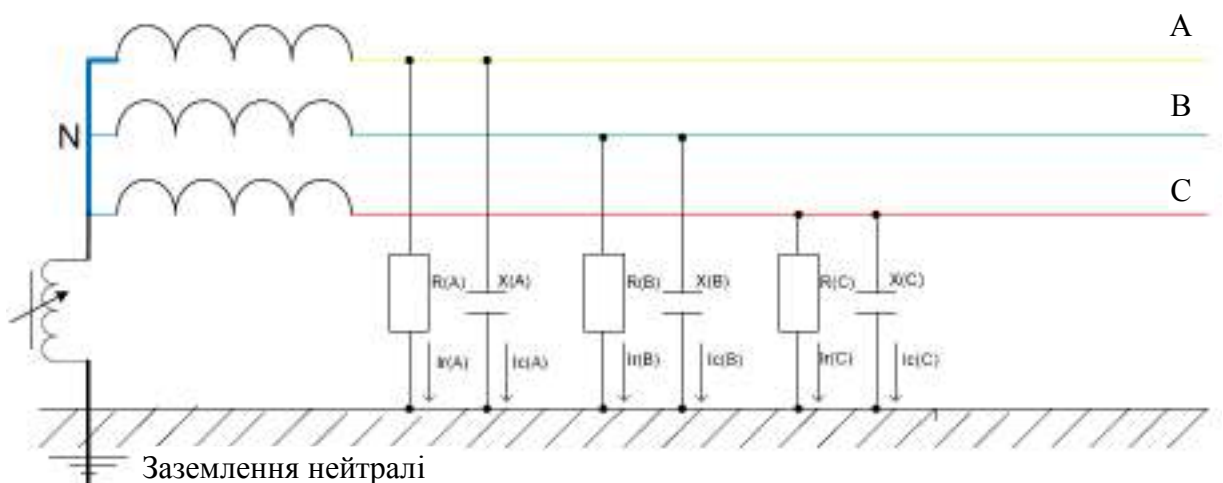


Рис.1.3 Електрична мережа з компенсованою нейтраллю

1.3. Застосування електричних мереж з різними режимами роботи нейтралі

Електрична мережа з ефективно заземленою нейтраллю - трифазна електрична мережа з напругою вище 110 кВ, в якій коефіцієнт замикання на землю не перевищує 1,4 (рис.1.4). Застосовується в мережах 110 кВ і вище.

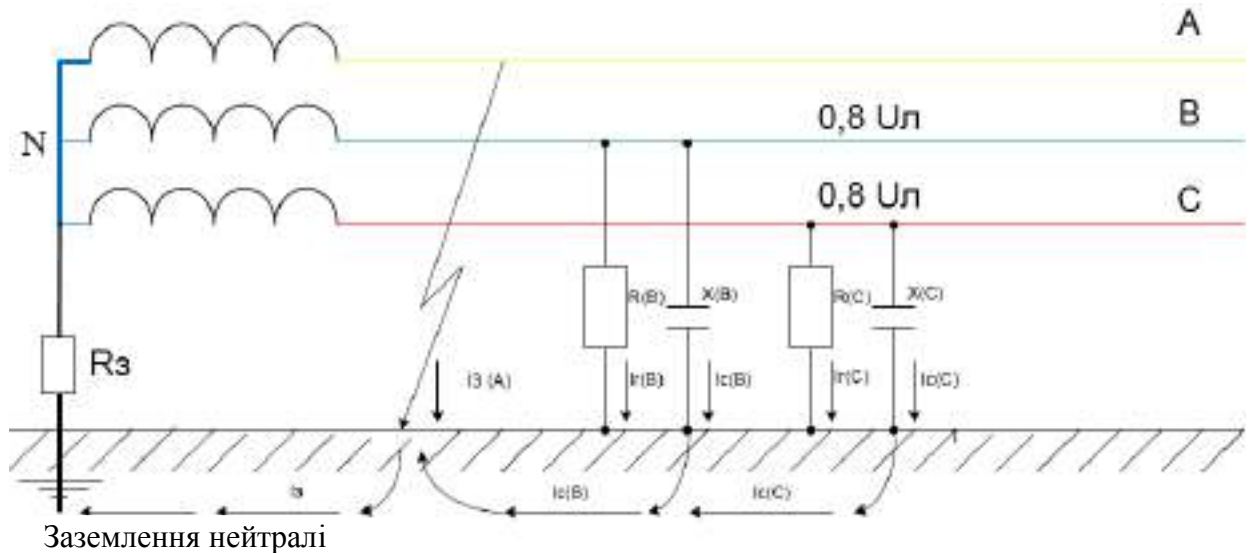


Рис.1.4 Коротке замикання в електричній мережі з глухо заземленою нейтраллю

Коефіцієнт замикання на землю в трифазній електричній мережі – це відношення різниці потенціалів між неушкодженою фазою і землею в точці замикання на землю іншій або двох інших фаз до різниці потенціалів між фазою і землею в цій точці до замикання.

При такому способі заземлення під час однофазних замикань напруга на неушкоджених фазах відносно землі дорівнює приблизно 0,8 міжфазної напруги в нормальному режимі роботи мережі. Це основна перевага такого способу заземлення нейтралі.

При замиканні однієї фази на землю, утворюється короткозамкнутий контур через землю і нейтраль джерела з малим опором, до якого прикладена е.р.с. фази (рис.1.4). Виникає режим короткого замикання, що супроводжується протіканнями великих струмів (більше 500 А). Щоб уникнути ушкодження устаткування тривале протікання великих струмів неприпустимо, тому коротке замикання швидко відключається релейним захистом.

Електрична мережа з резонансно - заземленою нейтраллю - нейтраль трансформатора або генератора приєднана до заземлюючого пристрою через дугогасильний реактор (рис.1.5). Застосовується в мережах 3-35 кВ для зменшення струму замикання на землю.

У нормальному режимі роботи струм через реактор практично дорівнює нулю. При повному замиканні однієї фази на землю дугогасильний реактор опиняється під фазною напругою і через місце замикання на землю протікає разом із ємнісним струмом $I(C)$ також індуктивний струм реактора $I(L)$ (див. рис.1.5). Оскільки індуктивний і ємнісний струми відрізняються по фазі на кут 180° , то в місці замикання на землю вони компенсують один одного. Якщо $I(C) = I(L)$ - резонанс, то через місце замикання на землю струм протікати не

Мережа продовжуватиме працювати в повнофазному режимі, але при цьому напруга двох неушкоджених фаз по відношенню до землі збільшаться до лінійних значень. Це викликає небезпеку для персоналу, і тому в усіх електроустановках з ізолюваною нейтраллю мають бути забезпечені контроль ізоляції, швидке виявлення персоналом мережі замикання на землю і швидка їх ліквідація.

Розглянемо використання різних типів електричних мереж з різними режимами роботи нейтралі в суднових системах, виходячи з наступних критеріїв:

- електробезпеки людини;
- економічності системи;
- надійності електропостачання;
- пожежебезпеки на судні.

Електробезпека людини при різних режимах нейтралі слід розглядати і зіставляти, оцінюючи можливу величину струму через людину при дотику до голого провідника однієї фази. Такий дотик в умовах експлуатації суднових електричних установок цілком імовірний, і з ним слід вважатися. Помітимо, що одночасно дотик до дротів двох фаз ставить людину в значно небезпечніші умови, оскільки незалежно від нейтралі струм через тіло людини визначатиметься лінійною напругою обладнання. Проте одночасне торкання голих дротів двох фаз зустрічається рідко, і було б несправедливо приймати його за критерій безпеки обладнання.

Розглянемо умови безпеки в системі з ізолюваною нейтраллю. Торкаючись до голого дроту однієї з фаз трифазної системи з ізолюваною нейтраллю, людина виявляється підключеною в коло в якому протікає струм:

$$I = U_{\phi} \cdot G_{\text{Л}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{G_{\text{Л}}(G_{\text{Л}} + 6G_{\text{Л}}G_{\phi})}{9(G_{\phi}^2 + \omega^2 C_0^2)}}$$

де G_{ϕ} (R_{ϕ}) - провідність (опір) ізоляції кожної з фаз по відношенню до корпусу судна;

$G_{\text{Л}}$ - провідність тіла людини;

C_0 - ємність кожної з фаз системи по відношенню до корпусу.

З цього виразу виходить, що струм через тіло людини з провідністю $G_{\text{Л}}$ в системі з ізолюваною нейтраллю визначається U_{ϕ} , R_{ϕ} , $G_{\text{Л}}$ і C_0 . За інших рівних умов найменше значення струму I буде при $C_0=0$. Із зростанням C_0 струм I зростає, отже, небезпека поразки зростає.

Якщо ємність мережі більше деякого граничного значення, яке можна назвати критичним $C_{\text{кр}}$ (при $U=220$ В $f=50$ Гц, $C_{\text{кр}}=0,147$ мкФ), то при будь-якому рівні опору ізоляції, який заміряний на постійному струмі, струм I виявляється більше за безпечний для людини струм. Отже при $C_0 > C_{\text{кр}}$ підвищення рівня опору ізоляції електричної системи з ізолюваною нейтраллю не може бути засобом, що забезпечує безпеку людини. Чим більше C_0 , тим ближче струм I до струму через тіло людини в системі з глухим заземленням

нейтралі. Починаючи з $C_0 = 2-5$ мкФ струм I в системах з ізолюованою і глухо заземленою нейтраллю практично однаковий.

Проте при ємності кожної з фаз $C_0 < C_{кр}$, що може спостерігатися на малотоннажних суднах, суднова система з ізолюованою нейтраллю забезпечує кращі умови безпеки ніж з глухо заземленою нейтраллю, і ці умови тим краще, чим вище опір ізоляції кожної з фаз.

На середньо- і великотоннажних суднах сучасних типів, за даними вимірів, $C_0 > C_{кр}$, тому на таких судах системи з ізолюованою і заземленою нейтраллю забезпечують практично однакові умови електробезпеки.

Для ефективного підвищення безпеки на судах з $C_0 > C_{кр}$ слід перейти від систем з ізолюованою нейтраллю до систем з нейтраллю, заземленою через індуктивність (індуктивний реактор), з тим, щоб компенсувати складову ємності струму через тіло людини індуктивною складовою. Систему з нейтраллю, заземленою через індуктивний реактор, можна назвати компенсованою системою або системою з компенсованою нейтраллю.

Зниження струму I шляхом заземлення нейтралі через індуктивність дуже значне, якщо індуктивність настраюється так, що дотримуються умов резонансу, коли індуктивний струм I_l дорівнює ємнісному струму I_c ($I_l = I_c$). Суднові електричні системи з компенсованою нейтраллю при будь-кому практично можливому на судах C_0 зберігають усі переваги систем з ізолюованою нейтраллю - в цьому їх цінна особливість.

Отже, виходячи з умов **електробезпеки** для судів з $C_0 \ll C_{кр}$ (малотоннажні судна), слід застосовувати систему з ізолюованою нейтраллю, а для судів з $C_0 > C_{кр}$ (середньо- і великотоннажні судна) - систему з компенсованою нейтраллю. На морських судах сучасних типів, як правило, $C_0 \gg C_{кр}$.

Економічність вирішення питань електропостачання на судах істотно залежить від режиму нейтралі системи лише у тому разі, якщо при системі з глухим заземленням нейтралі в якості зворотного дроту використовувати корпус судна. Тоді, за рахунок застосування одножильних кабелів замість дво жильних, однополюсних вимикачів- замість дво полюсних, а також за рахунок виключення трансформаторів для живлення однофазних приймачів напругою 220 або 127 В, можна зменшити витрати на розподільну мережу на 30-50%. Окрім економії у вазі і вартості кабелю і трансформаторів, знижуються витрати на електромонтажні роботи і зменшуються габарити і вага розподільних пристроїв. Очевидно, що економія тим більше, чим більше на судні однофазних приймачів. Так, на пасажирських судах можлива економія вища, ніж на судах суховантажних.

Можливе зменшення витрат на розподільну мережу - основна перевага трифазної системи з глухо заземленою нейтраллю.

На судах з $C_0 > C_{кр}$ перехід від режиму з ізолюованою нейтраллю до режиму з глухо заземленою нейтраллю практично не змінює умов електробезпеки, але відкриває перспективу зменшення витрат на розподільну мережу.

На судах з $C_0 < C_{кр}$ перехід до системи з глухо заземленою нейтраллю погіршує умови електробезпеки. Можлива економія у вартості при цьому навряд чи може бути взята до уваги, тим паче, що на судах з малим C_0 протяжність мережі мала і, значить, економія також відповідно мала.

Надійність електропостачання споживачів на судні істотно залежить від режиму нейтралі суднової електричної системи.

У системах з ізолюваною нейтраллю можуть бути, як відомо, трьох- і двофазні короткі замикання, які відключаються захисними апаратами аварійної ділянки.

При однофазному замиканні на корпус судна в системі з ізолюваною нейтраллю струм ушкодження малий, трикутник міжфазної напруги практично не змінюється, приймачі продовжують працювати нормально. Ушкодження може бути виправлене без відключення пошкодженої ділянки і, отже, без перерви електропостачання до споживачів.

У системі з глухо заземленою нейтраллю можуть бути не лише трьох- і двофазні короткі замикання, які відключаються апаратами захисту, але і однофазні. При однофазних коротких замиканнях, струм ушкодження великий: в деяких випадках він може бути більше струму трьох- або двофазного короткого замикання, отже, однофазні короткі замикання також повинні відключатися захисними апаратами.

Статистика ушкоджень не раз встановлювала, що однофазні замикання на корпус судна зустрічаються в десятки разів частіше трьох- або двофазних замикань між струмопроводами.

Відключення захистом споживачів при будь-якому короткому замиканні, збільшує в десятки разів вірогідність раптової перерви живлення в системах з глухим заземленням нейтралі, зменшує надійність електропостачання споживачам, у тому числі, життєво важливих для судна (двигуни рульової машини, насоси та ін.), вимагає розширення застосування схем з автоматичним введенням резерву.

Як було помічено, в системі з глухим заземленням нейтралі можливо використовувати дві напруги: лінійне і фазне, і, отже, немає необхідності трансформувати напругу для живлення побутових споживачів судна, що здешевлює розподільну мережу і зменшує її вагу. Проте мережа без трансформаторів має і свої недоліки: так, наприклад, при ушкодженні в мережах побутових споживачів залишкова напруга на шинах розподільних щитів в аварійному і після аварійному. режимах буде менше, ніж в мережах з трансформаторами, зросте струм витоку і т. п.

У системі з компенсованою нейтраллю надійність електропостачання не менше ніж і в системі з ізолюваною нейтраллю.

Пожежебезпечність. Трьох- і двофазні короткі замикання в судових системах відбуваються рідко, вірогідність їх мала. Причому ще менше вірогідне замикання двох або трьох фаз через корпус судна. Отже, великі аварійні струми через корпус судна в системах з ізолюваною або компенсованою нейтраллю практично ніколи не протікають. Навпаки, в системах з глухим заземленням нейтралі великі аварійні струми через корпус судна протікають відносно часто -

при кожному однофазному короткому замиканні. При цьому кожне однофазне коротке замикання може супроводжуватися електричною дугою між фазою і корпусом судна: можливе утворення дуги і в місцях поганого контакту на шляху струму між місцем короткого замикання і точкою заземлення нейтралі джерела струму.

Вірогідність виникнення пожежі в системах з глухим заземленням нейтралі велика, тому класифікаційні суспільства усіх країн виключають застосування на танкерах систем з глухим заземленням нейтралі.

Усе вище сказане зведено до таблиці 1.1.

Табл.1.1. – Порівняння різних методів заземлення

Тип заземлення	Безпечність	Економічність	Надійність	Пожежебезпека
Глухе заземлення	Низька	Висока для великих суден	Низька	Дуже низька
Ізольоване заземлення	При $C_0 < C_{кр}$ висока При $C_0 > C_{кр}$ низька	Середня для малих суден	Середня	Середня
Компенсоване заземлення	При $C_0 > C_{кр}$ сама висока	Низька	Висока	Висока

1.4. Аналіз можливості застосування високовольтних електростанцій для суден з системами електроруху

Питання про доцільність застосуванні високовольтних електростанцій для суден з системами електроруху потужністю більше 15 МВ·А дуже актуальне і вирішується на стадії проектування судна.

Зростання енергоозброєності морських суден, обумовлене в першу чергу застосуванням потужних електроприводів в електрорусі, підрулюючих пристроях, вантажних насосах і інших механізмах, зажадало переходу від звичайної трифазної напруги 440 В до високовольтних систем не дивлячись на те, що вартість низьковольтного устаткування і його установка, в порівнянні з високовольтним, є відносно низькою, і експлуатація його не вимагає високого рівня кваліфікації для безпечної роботи. Проте, коли йдеться про потужні електроприводи, то такі критерії, як падіння напруги і втрати в лінії стають визначальними у виборі величини напруги живлення.

Класична побудова єдиних електроенергетичних установок з рівнем напруги 1000 В (наприклад, рівним 690 В) знаходить широке застосування у вітчизняному і зарубіжному суднобудуванні. Це рішення схемотехніки дозволяє використовувати пропульсивну установку сумарною потужністю до 16 МВ·А. По мірі досягнення верхньої межі потужності, істотно зростають струми збірних шин головних розподільних щитів, що обумовлює необхідність застосування системи подвійних шин і комутаційних апаратів з високою комутаційною здатністю. У конструктивному плані система подвійних шин характеризується двократним збільшенням кількості секцій головних розподільних щитів і погіршенням масогабаритних показників. По мірі збільшення номінального струму збірних шин, струм в режимі короткого замикання може перевищити граничний струм відключення комутаційних апаратів, тоді досягнення

необхідної потужності системи стане неможливим. В цьому випадку раціональним рішенням стає застосування високовольтних електричних станцій з використанням комутаційної апаратури напругою, рівною 6 кВ або 10 кВ. За рахунок збільшення напруги головних генераторів відбувається пропорційне зниження струму на збірних шинах. Це дозволяє відмовитися від системи подвійних шин і виконати компоновання головного розподільного пристрою за спрощеною схемою. Зниження величини струму спричиняє за собою зменшення перерізу збірних шин, а також живлячих кабелів, що відходять. Необхідність введення знижувальних трансформаторів призводить до незначного зниження масогабаритних показників суднових електричних станцій, що компенсується зменшенням ваги головних розподільних щитів і кабельних трас.

Наприклад, якщо розглянути споживача невеликої потужності 10 кВт, з трифазною напругою 380 В (низька напруга) з повним опором лінії передачі 0,1 Ом·м та щільністю струму 5 А/мм², то струм навантаження складе

$$I_H = \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380} \approx 15 \text{ А}, \text{ тоді падіння напруги в лінії передачі на 1 м складе усього}$$

лише $U_R = 15 \cdot 0,1 \approx 1,5 \text{ В}$, тобто близько 0,4 %, а втрати в лінії складуть

$$P = \sqrt{3} \cdot U_R \cdot I_H = \sqrt{3} \cdot 1,5 \cdot 15 \approx 38,7 \text{ Вт на 1 м лінії, тобто 0,39 \%, при цьому переріз}$$

кабелю складе усього біля $S \approx \frac{I}{i_s} \approx \frac{15}{5} \approx 3 \text{ мм}^2$ (при щільності струму 5 А/мм², а

$$\text{діаметр кабелю близько } d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} \approx \sqrt{\frac{4 \cdot 3}{3,14}} \approx 2 \text{ мм. Усе це є нормою, і немає}$$

необхідності застосовувати високу напругу.

Проте, ситуація різко змінюється при збільшенні потужності навантаження при тій же напрузі до 1 МВт. Тоді маємо: струм навантаження складе $\frac{1000000}{\sqrt{3} \cdot 380} \approx 1530 \text{ А}$. Для цього струму необхідний кабель перерізом

$$S = \frac{1530}{5} \approx 310 \text{ мм}^2, \text{ тобто діаметр кабелю складе близько } d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} \approx \sqrt{\frac{4 \cdot 310}{3,14}} \approx 20$$

мм. Падіння в лінії передачі на 1 м складе $U_R = 1530 \cdot 0,1 \approx 153 \text{ В}$, тобто близько 40%, а втрати в лінії складуть $P = \sqrt{3} \cdot U_R \cdot I_H = \sqrt{3} \cdot 153 \cdot 1530 \approx 403 \text{ кВт на 1 м лінії, тобто близько 40 \%}$.

Усе це, очевидно, є неприйнятним і викликає необхідність застосування високовольтної системи, оскільки при тій же потужності 1 МВт напрузі 10 кВ (середня напруга) отримаємо: струм навантаження $\frac{1000000}{\sqrt{3} \cdot 380} \approx 58 \text{ А}$. Для цього

струму необхідно кабель перерізом $S = \frac{58}{5} \approx 12 \text{ мм}^2$, тобто діаметр кабелю

$$\text{складе близько } d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} \approx \sqrt{\frac{4 \cdot 12}{3,14}} \approx 3,9 \text{ мм. Падіння в лінії передачі на 1 м складе}$$

$U_R = 58 \cdot 0,1 \approx 5,8 \text{ В}$ тобто близько 0,06 %, Втрати в лінії складуть $P = \sqrt{3} \cdot U_R \cdot I_H = \sqrt{3} \cdot 5,8 \cdot 58 \approx 579 \text{ Вт на 1 м лінії, тобто близько 0,058 \%}$. Це

виправдовує використання високовольтної системи, незважаючи на підвищення вимог до експлуатації і ремонту високовольтного суднового устаткування.

В роботі [1] проведений порівняльний аналіз побудови єдиних електроенергетичних установок суден з потужністю головної енергетичної установки в 16 МВт в двох варіантах:

1 варіант – єдина електроенергетична станція на 690 В і система електроруху на 690 В;

2 варіант - єдина електроенергетична станція на 6,3 кВ і система електроруху на 690 В.

У першому випадку (рис. 1.7) суднова електрична станція утворює дві системи трифазних шин з головним розподільним пристроєм напругою 690 В. Між шинами головного розподільного щита реалізовано зрушення по фазі напруги на 30° , що забезпечує живлення статичних 12-пульсних перетворювачів без застосування погоджувальних трансформаторів з розщепленою вторинною обмоткою. Напівпровідниковий перетворювач частоти для живлення гребного електродвигуна і підрулюючих пристроїв одночасно отримує живлення від двох систем шин головного розподільного щита. Гребний електродвигун виконаний на напругу 690 В. Споживачі власних потреб отримують живлення від двох триобмоткових трансформаторів. Напруга на виході трансформаторів власних потреб складає 400 В.

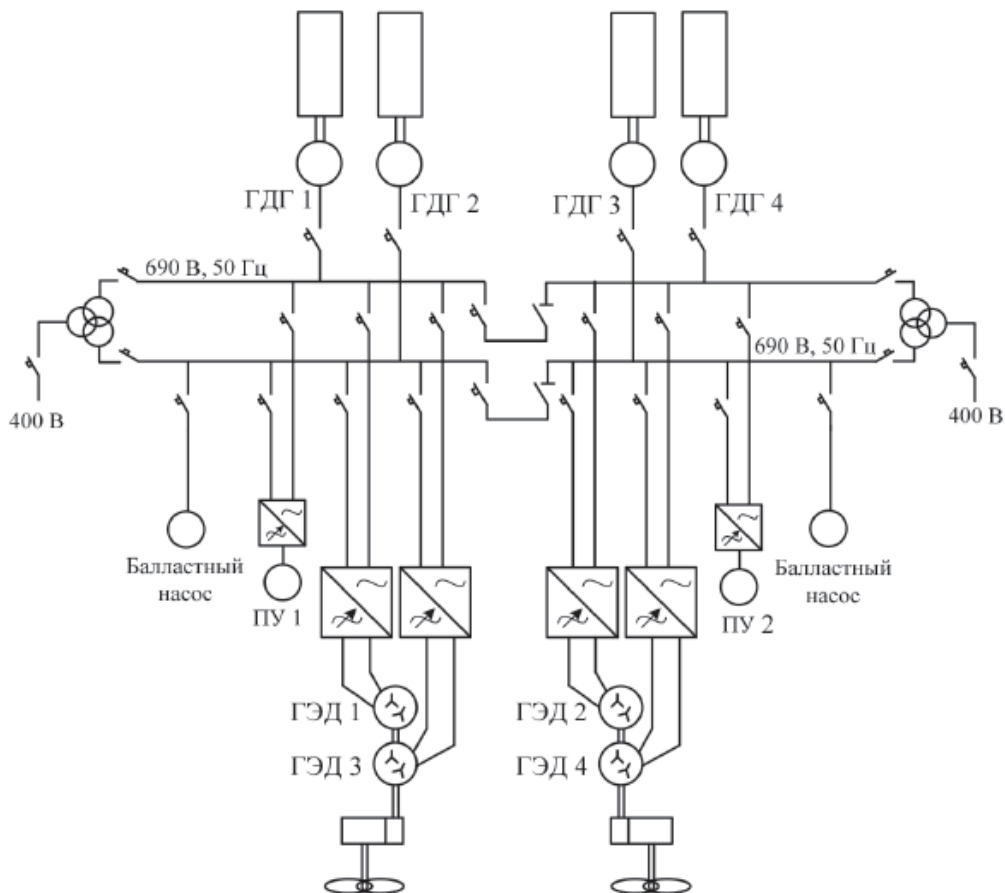


Рис.1.7 Єдина електроенергетична система на 690 В з системою електроруху на 690В:

ГДГ – головний дизель – генератор; ГЕД – гребний електродвигун;
ПУ – підрулюючий пристрій;

У другому випадку (рис.1.8) генератори включені на загальну систему шин головного розподільного щита з напругою 6,3 кВ. Перетворювачі частоти для живлення гребного електродвигуна отримують живлення через знижувальні триобмоткові трансформатори. Гребний електродвигун виконаний на напругу 690 В. Споживачі власних потреб отримують живлення від двох двохобмоткових трансформаторів. Напруга на виході трансформаторів власних потреб складає 400 В.

Склад основного устаткування суднової електроенергетичної станції вибраний наступним::

- головні дизель-генератори потужністю 5 МВт - 4 шт.;
- гвинто-рульові колонки потужністю 8 МВт - 2 шт.;
- носові підрулюючі пристрої потужністю 1 МВт - 2 шт.

При однаковій потужності суднової електроенергетичної станції у високовольтному варіанті значно зменшується струмове навантаження електроустаткування, у тому числі:

- істотно знижуються струми генераторів (так, для генератора потужністю 5 МВт в першому варіанті значення струму складатиме 5 000 А, а для суднової електростанції на 6,3 кВ - 550А);
- у високовольтній схемі сумарний номінальний струм збірних шин

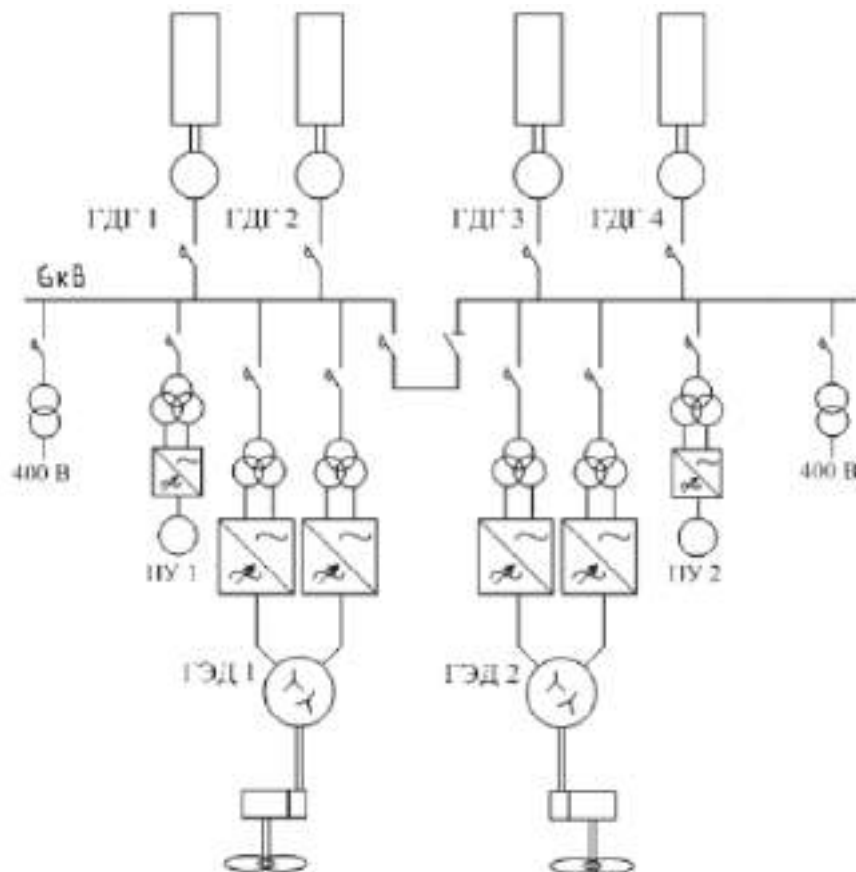


Рис.1.8 Єдина електроенергетична система на 6 кВ з системою електроруку на 690В:

ГДГ – головний дизель – генератор; ГЕД – гребний електродвигун;
ПУ – підрулюючий пристрій;

дорівнює 2 200 А, в низьковольтній схемі - 20 000 А;

- значно менше струми короткого замикання, а отже, нижче вимоги до термічної і динамічної стійкості шинопроводів.

Зниження струмів у високовольтній суднової електроенергетичної станції дозволяє:

- зменшити переріз збірних шин щитового устаткування;
- зменшити перерізи кабельних ліній як за умовами нормального режиму експлуатації, так і в режимі короткого замикання;
- зменшити вагу і габарити щитового устаткування, генераторів і кабельних трас.

У таблиці 1.2 приведені розрахунки технічних характеристик устаткування суднової електроенергетичної станції для двох варіантів виконання. Рівні живлячої напруги при однаковій потужності передачі в обох варіантах визначають різницю в перерізі кабельних трас.

Таким чином, в таблиці 1.2 розглянуто три основні ділянки кабельних трас :

Таблиця 1.2 Порівняння варіантів побудови кабельних трас СЕС на 6,3 кВ та 690 В

Параметр	ГРУ на 6,3 кВ	ГРУ на 690 В
Габарити, мм х мм х мм	8800х1000х1900	11250х820х2220
Маса, т	5,8	10
Кількість секцій, шт	12	16
Кількість силових вимикачів, шт	11	24
Струм генератора, А	550	5000
Струм однієї ГРК, А	1500	8000
Струм одного ПУ, А	125	1000
Номинальний струм збірних шин, А	1100	5000
Сумарний струм збірних шин, А	2200	20000
Кількість кабелів у прокладці, загальна довжина і вага кабелів потужних споживачів СЕС		
Кабельна траса на 1-й ділянці: ДГА-ГРУ 50 м (для 4-х генераторів)	12 шт, Всього 0,6 км, 3,72 т	100 шт, Всього 5 км, 17 т
Кабельна траса на 2-й ділянці: :ГРУ-ВРК 120 м (для 2-х ВРК)	16 шт, Всього 1,92 км, 11,9 т	80 шт, Всього 9,6 км, 32,64 т
Кабельна траса на 3-й ділянці: :ГРУ-ПУ 30 м (для 2-х ПУ)	2 шт, Всього 0,06 км, 0,37 т	10 шт, Всього 0,3 км, 1,02 т
Сумарна довжина і вага кабельних трас потужних споживачів	2,58 км, 15,996 т	14,9 км, 50,66 т

1-а ділянка - дизель-генераторний агрегат – головний розподільний пристрій;

2-а ділянка - головний розподільний пристрій - приміщення гвинто-рульових колонок;

3-а ділянка - головний розподільний пристрій - приміщення носового підрульного пристрою

Для порівняння двох схем суднової електростанції були вибрані високовольтний і низьковольтний кабель фірми Nexans з наступними технічними характеристиками:

- MPRXCX - FLEX 0.6/1 кВ 3 × 95 (205 А), діаметр - 40 мм, маса 3400 кг/км;

- MPRXCX 6/10 кВ $\times$ 35 (205 А), діаметр - 60 мм, маса - 6200 кг/км.

(Вибір кабелю з вказаним однаковим перерізом обумовлений завданням зробити теоретичне порівняння кабельних трас з різною номінальною напругою).

Порівняння двох варіантів виконання суднової електроенергетичної станції потужністю 20 МВт показує, що застосування високовольтної суднової електричної станції на 6,3 кВ є технічно обґрунтованим і перспективним і має ряд істотних переваг. Серед основних переваг високовольтної суднової електростанції необхідно відмітити наступні:

- зниження маси і габаритів головного розподільного пристрою;
- значне спрощення системи збірних шин;
- зниження кількості секцій на 25 %;
- зменшення кількості силових вимикачів на 55 %, що підвищує надійність головного розподільного пристрою;
- значне зниження струму збірних шин і струму живлячих генераторів, що призводить до істотного зниження рівня струму короткого замикання;
- значне зниження номінального струму кабельних трас, що призводить до істотного зниження кількості кабелів в прокладенні і зниження їх загальної протяжності в 5,8 разів і ваги в 3,2 рази;
- підвищення ККД щитового устаткування за рахунок зниження теплових втрат;
- зменшення на 15 % вартостей устаткування суднової електроенергетичної станції.

Проте, застосування високовольтних систем на морських судах значною мірою змінює філософію безпечної експлуатації суднового електроустаткування, що в першу чергу відображається у Вимогах міжнародної електротехнічної комісії (МЕК) і класифікаційних суспільств відносно проектування, виготовлення і установки високовольтного устаткування, а також в стандартах компетенції суднового персоналу, потрібних Положеннями конвенцій Міжнародної морської організації (ІМО), Правилами, інструкціями і іншими нормативними документами Морських Адміністрацій відносно безпечної експлуатації високовольтного устаткування.

Належний рівень безпечної експлуатації суднового електроустаткування досягається особами, що мають достатні технічні знання по своїх функціональних обов'язках, що дозволяє їм уникати небезпеки.

Згідно з цими вимогами потрібний чіткий розподіл мереж низьковольтної, середньовольтної і високовольтної напруги в судновому електроустаткуванні, що приведене рис.1.9

Зважаючи на те, що нині на судах все частіше переходять від низьковольтного устаткування до високовольтного устаткування, електромеханіки окрім технічних аспектів своєї роботи з низьковольтним устаткуванням, повинні знати процедури, правила і документи безпеки, по яких вони працюють, а також ясно зрозуміти відповідальність по забезпеченню безпеки і безпечної роботи з високовольтним устаткуванням.

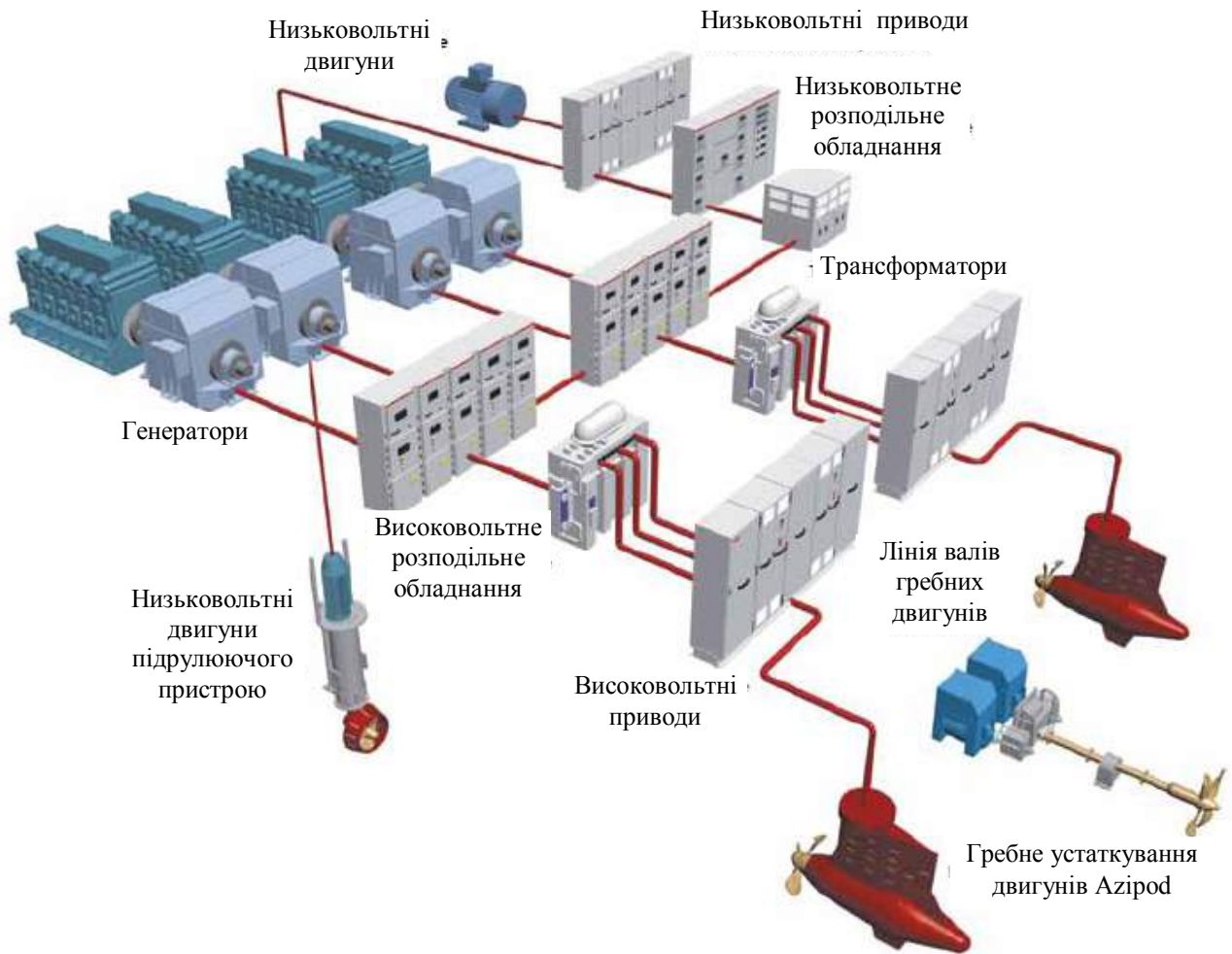


Рис.1.9 Приклад розподілу мереж низьковольтної і високовольтної напруги в судновому електроустаткуванні

Враховуючи, що головною причиною виходу з ладу високовольтного устаткування є відмови ізоляції струмоведучих частин, але найбільші зусилля спрямовуються на збереження її цілісності. І тут особливу роль грає знання закономірностей зародження і розвитку розрядів в ізоляції в різних типах діелектриків.

У високовольтному устаткуванні широко використовують різні газоподібні, рідкі і тверді ізоляційні матеріали, а також їх комбінації. Будь-яка ізоляція підрозділяється на зовнішню (повітря і усе що знаходиться в повітрі) і внутрішню (ця ізоляція відокремлена від довкілля корпусом і може бути як газоподібною, рідкою, твердою або комбінованою). Тому знання властивостей різної ізоляції, методів її випробування і контролю, а також процесів старіння потрібні для електромеханіків, що працюють з високовольтним устаткуванням.

Особливістю роботи високовольтного устаткування є можливість виникнення перенапружень як зовнішніх (за рахунок грозових розрядів), так і внутрішніх (наприклад, комутаційних). Такі перенапруження можуть викликати ушкодження ізоляції, а означить і вихід високовольтного устаткування з ладу. Тому знання основних типів комутаційних перенапружень, а також шляхи їх гасіння теж потрібні для електромеханіків, що працюють з високовольтним устаткуванням.

Контрольні питання до розділу 1

1. Класифікація суднових електричних мереж
2. Режим роботи суднових електричних мереж.
3. Електрична мережа з ефективно заземленою нейтралю
4. Електрична мережа з резонансно - заземленою нейтралю
5. Електрична мережа з ізольованою нейтралю
6. Аналіз ефективності використання суднових електричних мереж з різним режимом роботи нейтралі з точки зору електробезпеки
7. Аналіз ефективності використання суднових електричних мереж з різним режимом роботи нейтралі з точки зору економічності.
8. Аналіз ефективності використання суднових електричних мереж з різним режимом роботи нейтралі з точки зору надійності електропостачання.
9. Аналіз ефективності використання суднових електричних мереж з різним режимом роботи нейтралі з точки зору пожежної безпеки.
10. Аналіз ефективності використання суднових електричних мереж з різним режимом роботи нейтралі.
11. Аналіз необхідності використання високовольного електрообладнання на судні.
12. Основні принципи розподілу суднових електричних мереж на низьковольтні та високовольтні.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНІКИ ВИСОКИХ НАПРУГ

Діелектрик, що знаходиться в електричному полі, може втратити властивості ізоляційного матеріалу, якщо напруженість поля перевищує деяке критичне значення. Явище утворення провідного каналу у діелектрику під впливом електричного поля називають *пробоєм*. Мінімальна прикладена до діелектрика напруга, що приводить його до пробую, називається *пробивною напругою* (рис. 2.1).

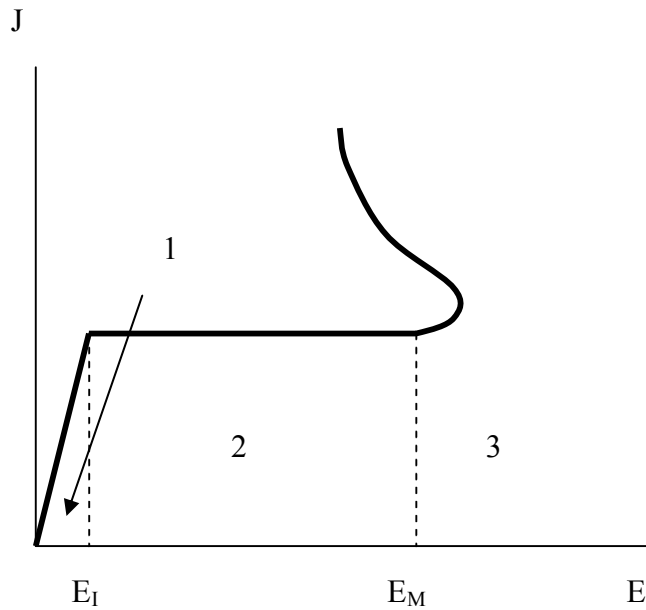


Рис.2.1. Залежність струму від напруженості поля для газів:

- 1 — ділянка виконання закону Ома;
2 — ділянка насичення; 3 — ділянка пробую

Для порівняння властивостей різних матеріалів більш зручною характеристикою є електрична міцність. *Електрична міцність* це мінімальна напруженість електричного поля, що приводить до пробую діелектрика. Якщо поле однорідне, електричну міцність можливо визначити так

$$E_M = U_{\text{ПР}}/d, \quad (2.1)$$

де $U_{\text{ПР}}$ - пробивна напруга;
 d - товщина діелектрика.

Якщо пробій відбувається у газоподібному або рідкому діелектрику, тоді пробита ділянка поновлює свої електричні властивості після зняття напруги. Такий пробій зветься зворотним.

В протилежність цьому в твердих діелектриках пробій часто завершується руйнуванням ізоляції. Такий пробій зветься незворотним.

2.1. Електричні розряди в газовому середовищі

Гази в якості діелектриків поширено використовують в різних електроізоляційних конструкціях. До них відносять в першу чергу такі гази як повітря та елегаз (SF_6). До них слід віднести також вакуум. Перевагами газової ізоляції є:

- добрі електроізоляційні властивості ;
- стабільність характеристик у процесі експлуатації ;
- відносна пожежна безпека;
- простота конструкцій електрообладнання з газовою ізоляцією.

Недоліками повітря як ізоляції є утворення озону при електричному розряді, що призводить до посилення корозії металевих частин

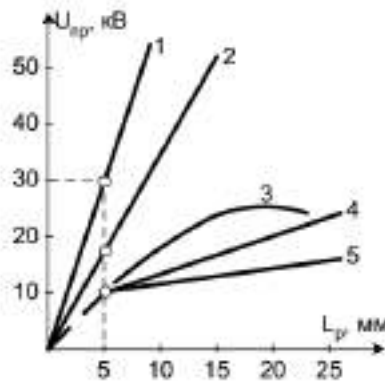


Рис.2.2 | – Залежність електричної міцності ізоляції від відстані між електродами:
 1 – повітря при тиску $p = 2,8$ МПа; 2 – елегаз при тиску $p = 0,7$ МПа;
 3 – трансформаторне масло; 4 – елегаз при тиску
 $p = 100$ кПа; 5 – повітря при тиску $p = 100$ кПа;

електрообладнання, а також суттєва залежність його електричної міцності від атмосферних факторів: вологості, температури, тиску, забруднення.

Недоліками елегазу є обмеження застосування через його скраплення при нормальному тиску і температурі -45°C . Для зниження робочої температури елегазу до нього додають 6% азоту, що розширює робочий діапазон елегазової ізоляції до -60°C (рис.2.2).

Атоми газу в нормальному стані є нейтральними частинками і знаходяться в хаотичному тепловому рівномірному русі, зіштовхуючись між собою і витрачаючи енергію. Довжина вільного пробігу λ атомів чи молекул в газі залежить від їх концентрації, і як наслідок від тиску та температури. З підвищенням тиску та зменшенням температури довжина вільного пробігу атомів зменшується.

При розгляді процесів у газі достатньо використовувати спрощену (планетарну) модель атома, не враховуючі його хвильових властивостей. У нормальному стані всі електрони знаходяться на стаціонарних орбітах, що відповідають мінімальному енергетичному стану атома. Структура атома згідно з планетарною моделлю складається з позитивно зарядженого ядра (протона), навколо якого на стаціонарних орбітах, що відповідають певним енергетичним рівням, знаходиться відповідна кількість негативно заряджених електронів, які компенсують заряд ядра. Тому атом в цілому залишається нейтральним, тобто газ фактично не проводить струм.

У сильному електричному полі напруженістю E вільні електрони, що мають заряд e і деяка кількість яких завдяки природним зовнішнім іонізаторам (сонячне випромінювання, УФ - випромінювання, радіаційний фон землі), завжди присутня в міжелектродному проміжку, рухаються в напрямку позитивного електрода (анода), що приводить до виникнення електричного струму в газі.

Перехід одного чи декількох електронів з нормальних орбіт на більш віддаленні від ядра орбіти зветься *збудженням атома*. Енергію, яка необхідна для збудження, атом (молекула) може отримати при зіттовхуванні з іншим атомом (ударне збудження) чи при поглинанні короткохвильового

випромінювання (фотозбудження). Час перебування атома у збудженому стані складає приблизно $10^{-8} \dots 10^{-10}$ с. Повернення атома в нормальний стан проходить спонтанно і супроводжується випромінюванням фотону з енергією $\varepsilon = h\nu$ (де h – постійна Планка, ν – частота). При цьому спостерігається світіння газу. Звичайно кількість збуджених атомів значно більше числа іонізованих.

Коли електрон віддаляється від ядра на значну відстань, тобто зникає його взаємодія з ядром атома, то електрон стає вільним. Виникає іонізація атома, в наслідок якої виникають дві незалежні заряджені частки: негативно заряджений електрон та позитивно заряджений іон. Енергія, яка необхідна для іонізації газу у електричному полі визначається як:

$$W = e\lambda E. \quad (2.2)$$

де e – заряд електрона; λ – довжина вільного пробігу електрона; E – напруженість електричного поля.

Енергія, яку поглинає при цьому атом, називається *енергією іонізації*, яка вимірюється в [eV] ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Вт} \cdot \text{с Дж}$). Значення енергії збудження для деяких газів наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1- Енергія збудження, іонізації та електрична міцність деяких газів

Газ	Хімічний склад	Мінімальна енергія, eV		E_M газу/ E_M повітря
		збудження	іонізації	
Вуглекислий газ	CO ₂		14,3	0,9
Азот	N ₂	6,1	15,8	1,0
Гексафторид сірки (елегаз)	SF ₆		19,3	2,5
Фреон	Cl ₂ F ₂		19,8	2,6
Неон	Ne		13,6	0,85
Водень	H ₂		21,5	0,51

Одночасно з іонізацією атомів і молекул газу проходить і зворотній процес – взаємної нейтралізації заряджених часток (рекомбінація). Внаслідок дії двох взаємно протилежних факторів – іонізації та рекомбінації – встановлюється рівноважний стан, при якому за одиницю часу іонізується і рекомбінує однакова кількість заряджених часток. Такий рівноважний стан характеризується деякою ступеню іонізації газу, тобто відношенням концентрації іонізованих часток до загальної концентрації усіх часток в газі:

$$K_{ion} = \frac{n_{ion}}{N_{\Sigma}} \quad (2.3)$$

де K_{ion} - коефіцієнт ступені іонізації газу;

n_{ion} - концентрація іонізованих атомів та молекул в газі;

$N_{\Sigma} \approx 10^{22} \text{ ат/см}^{-3}$ - загальна концентрація часток в газі.

У процесі іонізації деякі атоми можуть захоплювати електрони й утворювати негативні іони, це галогени: фтор, хлор, пари води, йод а також кисень. Такі гази звуть електронегативними.

Гази, в яких утворюються позитивні іони, називають *електропозитивними*, це азот, інертні гази, наприклад неон, гелій.

2.1.1 Види іонізації

Розподіляють об'ємну та поверхневу іонізацію. *Об'ємна іонізація* – це виникнення заряджених часток в об'ємі газу між електродами. *Поверхнева іонізація* – це випромінювання заряджених часток з поверхні електродів.

Об'ємна іонізація підрозділяється на:

1. Ударну іонізацію.
2. Ступінчасту іонізацію.
3. Фотоіонізацію.
4. Термоіонізацію.

Ударна іонізація – це зштовхування електрона з нейтральним атомом чи молекулою. Вільний електрон у сильному електричному полі напруженістю E набуває кінетичну енергію:

$$W_e = \frac{mV^2}{2} = e\lambda E, \quad (2.4)$$

де $V = \mu E$ - дрейфова швидкість електронів;

μ - рухомість заряджених часток ($\mu_e \approx 400 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ – рухомість електронів, $\mu_{ion} \approx 2 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ – рухомість іонів).

При цьому кінетична енергія часток може бути значно більш теплової енергії і бути достатньою для виникнення ударної іонізації.

Якщо ця енергія більша за енергію іонізації $W_e > W_i$, то при зіткненні електрона з нейтральним атомом відбувається передача цієї енергії атому, внаслідок чого його електрони переходять на більш віддалені орбіти, а електрони зовнішньої орбіти відриваються від атома. Цей процес називають ударною іонізацією. Відстань, на якій електрон накопичує достатню енергію для іонізації:

$$x = \frac{W_i}{eE} = \frac{U_i}{E} \quad (2.5)$$

Імовірність того, що електрон пролетить шлях x без зіткнень (імовірність іонізації), дорівнює:

$$P(x_n) = \exp\left(-\frac{x_n}{\lambda}\right) \quad (2.6)$$

Оскільки рухомість електронів значно вища рухомості іонів, то ударна іонізація іонами мала і визначною є ударна іонізація електронами (рис.2.3 а). Процес зростання кількості електронів, що рухаються в електричному полі в напрямку до анода, називають лавиною електронів. При розвитку лавини електронів поряд з ними утворюються позитивні іони, які через значно більшу масу рухаються набагато повільніше. Знаходячись у полі E , вони спотворюють його, що впливає на рух електронів. Позитивні іони можуть бути ще раз іонізовані, в результаті чого утворюються дво- або тризарядні іони і відповідна кількість електронів.

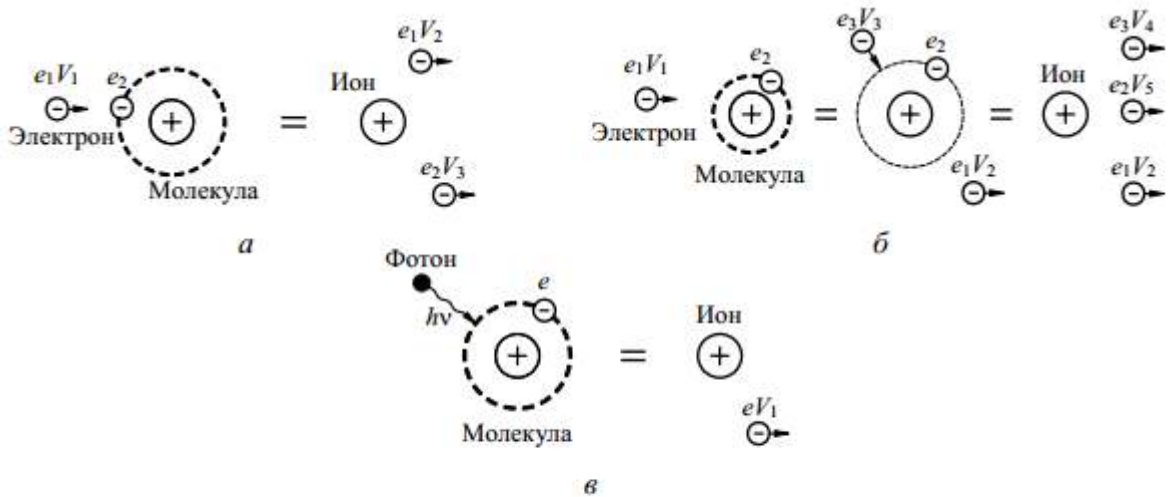


Рис.2.3 Схеми об'ємної іонізації газу:
 а – ударна іонізація; б - ступінчата іонізація; в – фотоіонізація;

Для повітря гранична напруженість електричного поля, що обумовлює процес іонізації (електрична міцність) дорівнює:

$$E_M = 24,5 \delta$$

де δ – густини повітря (при нормальних умовах $\delta = 1$, тоді $E_M = 24,5$ кВ/см).

Ступінчата іонізація виникає тоді, коли енергія першого електрона, який зштовхується з нейтральним атомом чи молекулою, достатня тільки для переводу атома в збуджений стан, тобто його енергії не достатньо для іонізації атома. Тому іонізація атома виникає за рахунок декількох зіткнень електронів з атомом, особиста енергія яких менша за енергію іонізації атома (рис.2.3 б). При цьому час між першим та другим зштовхуванням електронів з атомом повинен бути не більш часу знаходження нейтрального атома чи молекули в збудженому стані (приблизно 10^{-4} с).

Умовою ступінчатої іонізації є:

$$\frac{m_e V_1^2}{2} + \frac{m_e V_{31}^2}{2} \geq W_i \quad (2.7)$$

де m_e - маса електрона;

V_1, V_3 - швидкості електронів;

W_i - енергія іонізації атома чи молекули.

Фотоіонізація в об'ємі газу виникає тоді, коли енергія фотонів, які виникли в наслідок збудження атомів чи молекул, більш енергії іонізації при поглинанні фотона нейтральним атомом чи молекулою (рис.2.3 в). Цей процес частіше має місце у суміші газів, наприклад у повітрі. Фотоіонізація може бути і ступінчатою. Умовою фотоіонізації є:

$$h\nu \geq W_i \quad (2.8)$$

де h - постійна Планка;

ν - власна частота фотона.

Термоіонізація в об'ємі газу обумовлена тепловим станом газу і виникає в наслідок наступних актів:

1. Звільнення електрону при зштовхуванні атомів чи молекул при великих температурах, коли вони мають значну теплову швидкість.
2. Фотоіонізація нейтральних молекул чи атомів, які до того були збудженні в наслідок теплової взаємодії при великих температурах..
3. Іонізації при зштовхуванні електрона з нейтральним атомом чи молекулою при високих температурах.

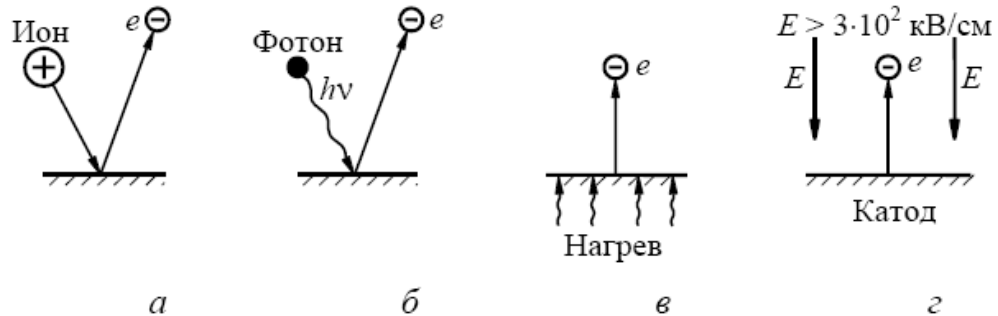


Рис.2.4 Схеми поверхневої іонізації газу:

а – іонізація іоном; б – іонізація квантом світла; в – термоіонізація;
г – автоелектронна іонізація

Поверхнева іонізація (емісія електронів) виникає в наслідок:

1. *Вторинної емісії*, тобто в наслідок бомбардування поверхні катоду позитивними іонами.. У цьому випадку, якщо енергія іона значна, то він може вибити електрон з поверхні металевго катоду, який стає вільним (рис.2.4 а). Умовою для виходу електрона з поверхні металевго електроду є:

$$\frac{m_{ion}V_{ion}^2}{2} \geq W_{Me} \quad (2.9)$$

де m_{ion} , V_{ion} - маса та швидкість іонів, відповідно;

W_{Me} - робота виходу електрона з металу.

2. *Фотоемісії*, тобто променевої енергії, яка діє на поверхню катоду, наприклад УФ світло, рентгенівське випромінювання, енергія фотонів, які виникли при поверненні збуджених атомів в звичайний стан. При поглинанні енергії такого випромінювання поверхнею металевго електроду можливий вихід електронів з поверхні металевго катоду (рис.2.4 б).

Умовою фотоемісії є:

$$h\nu \geq W_{Me} \quad (2.10)$$

де h - постійна Планка;

ν - власна частота фотона;

W_{Me} - робота виходу електрона з металу.

3. *Термоелектронної емісії*, тобто нагріву поверхні металевого електроду до значної температури при якій можливий відрив електрону з поверхні металевого електроду (рис. 2.4 в).
4. *Автоелектронної емісії*, тобто відриву електронів від поверхні металевого катоду в значних електричних полях (більш 300 кВ/см). Оскільки поверхня металу покрита шаром електронів металевого зв'язку, то значні електричні поля можуть відірвати такі електрони і зробити їх вільними (рис.2.4 г).

У будь якого випадку поверхневої іонізації необхідне, щоб енергія зовнішнього впливу була вище енергії виходу електрона з металу катоду. Ця енергія менш енергії об'ємної іонізації в 2 і більш разів і складає для мідних та сталевих електродів приблизно 4,5 еВ.

2.1.2 Лавина електронів

Якщо в газі між двома електродами, які утворюють однорідне електричне поле, виникає в наслідок іонізації вільний електрон, то він рухаючись до аноду при достатній напруженості електричного поля може іонізувати атом чи молекулу газу якщо вони зштовхнуться. В наслідок цього виникне новий (ще один) електрон і позитивний іон. Цей електрон разом з початковим електроном іонізує нові атоми і молекули, тоді кількість електронів буде безперервно зростати. Цей процес зветься *лавиною електронів*.

Інтенсивність розмноження електронів в лавині характеризується коефіцієнтом ударної іонізації α (перший коефіцієнт Таунсенда), який дорівнює кількості іонізацій, які спотворюються електроном на шляху 1 см по напрямленню електричного поля.

В процесі розвитку лавини одночасно з електронами виникають і позитивно заряджені іони. Рухомість таких іонів значно менш рухомості електронів, тому вони не встигають зміститися в електродному проміжку до катоду. Таким чином, після проходження лавини електронів в газі залишаються позитивні, а в електронегативних газах і негативні іони, які змінюють однорідне електричне поле в проміжку між електродами (рис.2.5). Тобто напруженість

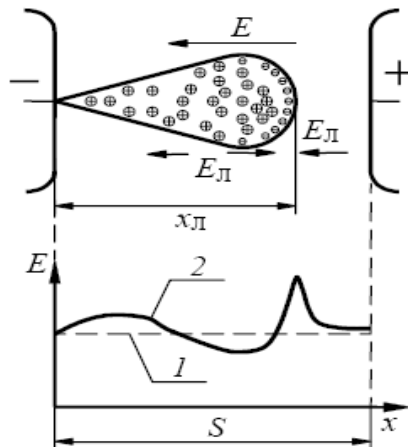


Рис.2.5 Викривлення електричного поля в проміжку, яке утворюється лавиною:

1 – середня напруженість без лавини; 2 – результуюча напруженість;

поля на фронті лавини наростає, в середній частині зменшується, а потім декілька зростає поблизу катоду.

Якщо поле однорідне, то коефіцієнт ударної іонізації постійний, тоді кількість електронів в лавині становить:

$$n = n_0 \cdot e^{(\alpha - \eta)x} \quad (2.11)$$

де α - коефіцієнт ударної іонізації;

n - кількість електронів в лавині на відстані x від катоду;

n_0 - кількість вільних електронів на початку розвитку лавини;

η - коефіцієнт прилипання, який характеризує можливість прилипання електронів к нейтральним атомам чи молекулам, тобто характеризує процес рекомбінації..

Реально кількість електронів в лавині може досягати більш 10^7 .

2.1.3 Умова виникнення самостійного розряду

Після проходження першої лавини лавинний процес може затухнути, або спотворюватися заново. Для спотворення лавинного процесу необхідний що найменш один ефективний вторинний електрон, здатний створити нову лавину. Така нова лавина називається *вторинною*. Якщо ефективний вторинний електрон виникає в наслідок дії зовнішнього іонізатора, то такий розряд зветься *несамостійним*, тобто якщо убрати зовнішній іонізатор, то лавинний процес не повториться і розряд затухне. При *самостійному розряді* після проходження первинної лавини процес спотворюється в наслідок проходження первинної лавини електронів, оскільки сама первина лавина електронів утворює умови для виникнення вторинної лавини електронів. Ці умови наступні:

1. Позитивні іони, які залишилися після проходження первинної лавини електронів, рухаючись до катоду бомбардують його і викликають появу нових вільних електронів в наслідок вторинної емісії.
2. Збуджені атоми та молекули, які виникають одночасно з іонізацією, повинні випромінювати фотони, які будуть приводити к фотоіонізації нейтральних атомів як на поверхні катоду, так і в об'ємі розрядного проміжку.

Кількість позитивних іонів, які залишаються в розрядному проміжку після проходження первинної лавини, приблизно дорівнює кількості електронів в лавині за виключенням первинних електронів n_0 при $x = S$:

$$N_+ \approx e^{(\alpha - \eta)S} - 1 \quad (2.12)$$

де S - відстань між електродами.

Електрони, які виникають в наслідок вторинної емісії не всі приймають участь в утворенні вторинних лавин, оскільки деякі з них рекомбінують з позитивними іонами. Тому сумарний процес виникнення вторинних електронів характеризується *коефіцієнтом вторинної іонізації* γ . (другий коефіцієнт Таунсенда). Цей коефіцієнт визначає внесок кожного первинного електрона у створення вторинного в процесі утворенні вторинної лавини. Звичайно $\gamma < 1$.

Кількість вторинних електронів, які виникли після проходження первинної лавини при самостійному розряді буде дорівнювати:

$$\gamma \cdot [e^{(\alpha-\eta)S} - 1] \geq 1 \quad (2.13)$$

Це рівняння і є умовою виникнення самостійного розряду в газах. Воно показує, що після проходження первинної лавини необхідне як мінімум один ефективний електрон, який здатний утворити вторинну лавину. Отже для виконання умови самостійного розряду необхідно, щоб кількість іонізацій, здійснюваних одним електроном, було не менше деякої визначеної величини. Для повітря при атмосферному тиску ця константа дорівнює $\alpha = 8 \dots 20$.

2.1.4 Виникнення стримеру

В ході розвитку лавини безперервно зростає кількість електронів та позитивних іонів. З ростом кількості електронів зростає і напруженість електричного поля у голові фронту лавини, тоді як у хвості лавини напруженість поля знижується. В наслідок цього електрони в голові лавини мають змогу рекомбінувати з іонами. При такій рекомбінації випромінюються фотони, які переміщуються практично миттєво в різних напрямках. Поблизу хвоста лавини вони мають змогу іонізувати нейтральні молекули, утворюючи вторинні лавини.

Ці вторинні лавини слідуючи за силовими лініями електричного поля, та маючи в голові лавини негативний заряд, будуть втягуватися у хвіст первинної лавини, оскільки він має позитивний заряд. Електрони вторинних лавин змішуючись з позитивними іонами в хвості первинної лавини створюють *стример* – тобто область в якій щільність електричного струму буде максимальною, та в наслідок розігріву ця область починає висвітлюватися, а найбільша концентрація заряджених частинок виникає поблизу катоду (рис.2.6).

Критерієм переходу лавинного розряду у стримерний є критичне значення

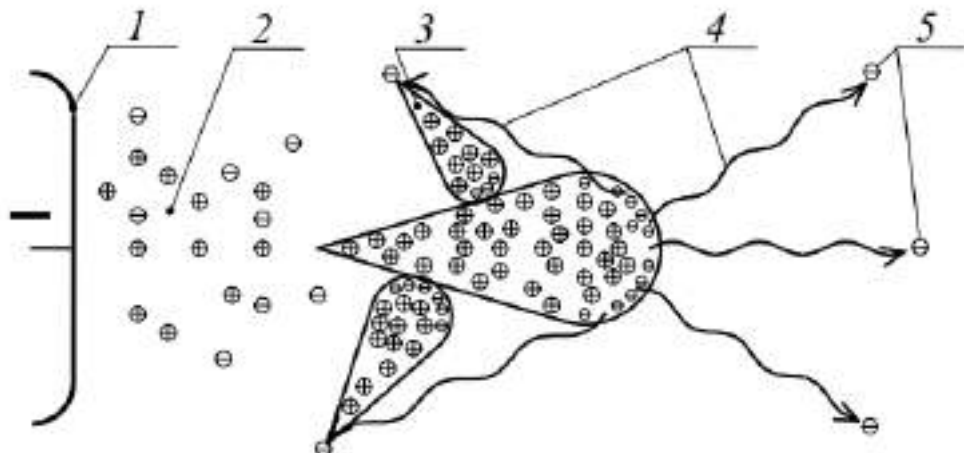


Рис.2.6 Механізм розвитку катодного стримеру:

1 – катод; 2 – канал стримеру; 3 – лавини; 4 – рух фотонів; 5 – електрони в наслідок фотоіонізації

кількості електронів у лавині. Звичайно при їх кількості більш ніж $10^7 \dots 10^9$

лавина переходить у стример. Для накоплення такої кількості електронів лавина повинна пройти деку критичну відстань. Тобто з зростанням відстані між електродами лавина завжди буде переходити у стримерну форму розряду. Ця критична відстань залежить від тиску та складу газу.

2.1.5 Закон Пашена

Виконання умови самостійності розряду (2.13) в однорідному полі визначає пробій розрядного проміжку. Прийняв $\eta=0$ та прирівняв вираз (2.13) одиниці маємо:

$$\gamma \cdot [e^{(\alpha)S} - 1] = 1 \quad (2.14)$$

Звідси:

$$e^{\alpha S} = 1 + \frac{1}{\gamma} \quad (2.15)$$

Після логарифмування отримуємо:

$$\alpha = \frac{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}{S} \quad (2.16)$$

де $\alpha = A_0 P e^{-\frac{B_0 P}{E}}$ (встановлена експериментально)
(2.17);

P – тиск газу;

E – напруженість електричного поля;

$A_0 = \frac{\pi \cdot r^2}{kT}$ - коефіцієнт, який залежить від складу газу;

r – радіус молекули;

k – постійна Больцмана;

T – температура у [K];

$B_0 = A_0 \cdot U_i$ - коефіцієнт, який залежить від енергії іонізації газу;

Прирівняв вирази (2.16) та (2.17) маємо:

$$\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) = A_0 P e^{-\frac{B_0 P}{E}} \quad \text{чи, оскільки } U = \frac{E}{S} \quad \text{маємо} \quad \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) = A_0 P e^{-\frac{B_0 P \cdot S}{U}}$$

Звідси отримуємо:

$$\frac{B_0 P \cdot S}{U} = \ln \frac{A_0 P \cdot S}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)} \quad (2.18)$$

Якщо $U = U_{пр}$, то

$$U_{пр} = \frac{B_0 P \cdot S}{\ln \frac{A_0 P \cdot S}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}} \quad (2.19)$$

Це рівняння є аналітичним виглядом *закону Пашена*, який встановлює залежність величини розрядної напруги від тиску газу p і відстані між електродами

Закон Пашена стверджує, що при незмінній температурі розрядна напруга газового проміжку з однорідним полем є функцією добутку тиску P на відстань

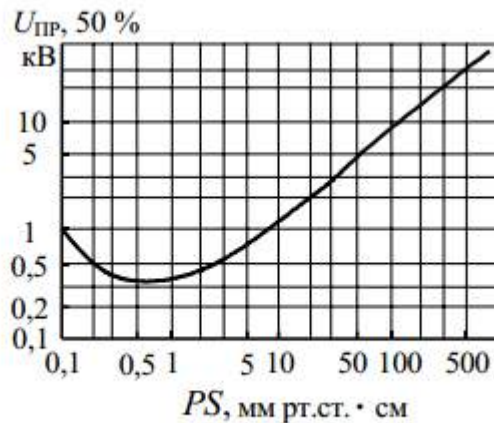


Рис.2.7 Графічне відображення закону Пашена для повітря:

S між електродами (рис.2.7). Якщо знизити тиск газу (при $S = \text{const}$), відповідно збільшується розрядна напруга, що обумовлено скороченням кількості зіткнень електронів з атомами. При збільшенні тиску розрядна напруга зростає за рахунок зменшення імовірності іонізацій атомів газу завдяки зменшенню кінетичної енергії електронів $W_e = e \cdot E \cdot \lambda$ (зменшується довжина вільного пробігу λ). При дуже великих тисках спостерігається відхилення від закону Пашена у вигляді зниження розрядних напруг, що обумовлене місцевими підсиленнями напруженості електричного поля на поверхні електродів завдяки їх мікрорельєфу. При низькому тиску експериментальні значення розрядної напруги також нижче розрахованих, що пов'язано з зміною механізму розряду завдяки тому, що основну роль починає відігравати автоелектронна емісія з електродів.

Закон Пашена у вигляді формули (2.19) дійсний при нормальній температурі. Так величині розрядної напруги в повітряному проміжку $L=1$ см при нормальних атмосферних умовах ($T=20^\circ\text{C}$, $P=760$ мм. рт.ст.) складає 30,9 кВ/см, а при збільшенні проміжку наближається до 24,5 кВ/см. Але зміна температури впливає зворотно від тиску. Для урахування впливу температури закон Пашена записується як:

$$U_{ПР} = f\left(\frac{P \cdot S}{T}\right) = f(\delta \cdot S) \quad (2.20)$$

де $\delta = \frac{T_0}{T} \cdot \frac{P}{P_0} = 0,386 \frac{P}{T};$

T – температура в [K].

Тоді:

$$U_{ПР_D} = U_{ПР_P} \cdot \delta \quad (2.21)$$

де $U_{ПР_D}$ - пробивна напруга при дійсних умовах вимірювання;

$U_{пр_р}$ - пробивна напруга згідно розрахунку по формулі Пашена (2.19).

Експериментальна крива Пашена відрізняється від розрахункової як в області малих так і великих значень додатку $P S$. В області малих значень різниця пояснюється приближенням до вакуумного пробою, при якому основну роль відіграють процеси на поверхні електродів, а не в об'єму газу. При великих значеннях різниця пояснюється збільшенням напруженості електричного поля на мікроступах електродів та зростанням ймовірності виникнення лавин, що знижує пробивну напругу.

2.1.6 Розряд в неоднорідному полі

В неоднорідному полі, на відміну від однорідного, напруженість електричного поля в різних точках проміжку між електродами може бути різною як по значенню, так і по напрямленню.

Пари електродів, що утворюють однорідне поле, наступні:

- площина – площина;
- куля – куля (при $D \geq L$);
- куля – площина.

Наступні пари електродів утворюють різко неоднорідне поле:

- стрижень – стрижень;
- стрижень – площина;
- куля – площина (при $D < L$).

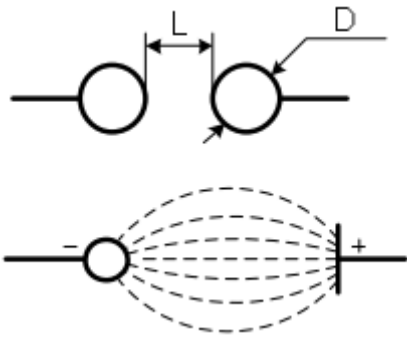


Рис.2.8 Приклад квазіоднорідного електричного поля ($D \ll L$)

Якщо поле утворене протяжними електродами і відстань між електродами L порівняна з їхніми розмірами D , то напруженість поля E в проміжку між електродами постійна і величина коефіцієнта

неоднорідності $k_H = \frac{E_{max}}{E_{cp}} \leq 4$, який

характеризує ступінь неоднорідності, не перевищує 4, то таке поле називають

квазіоднорідним (рис.2.8).

Електричні поля також бувають симетричними (якщо електроди однакової форми) або несиметричними (якщо вони різні).

Основні закономірності розвитку розряду в різко неоднорідних полях $k_H > 4$, практично однакові. При деякому значенні початкової напруги в проміжку виникає самостійний розряд в лавинній формі, оскільки поблизу стрижня знаходиться область з напруженістю електричного поля, яке перевищує значення, яке відповідає виникненню самостійної форми розряду (рис.2.9). Розряд локалізується в цій області, а вторинні лавини підтримуються або в наслідок фотоіонізації в об'ємі газу (при позитивній полярності на стрижні), або в наслідок фотоemisії чи автоemisії з катоду (при негативній полярності на стрижні). Такий розряд звуть *коронним розрядом в лавинній*

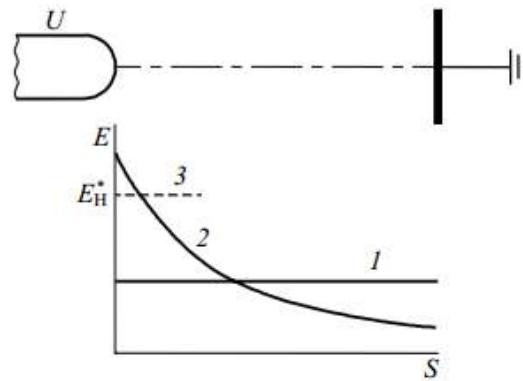


Рис.2.9 Залежність напруженості електричного поля від відстанями між електродами «стрижень – площа»:

$$1 - E_{CP} = f(S) = \frac{U}{S}; 2 - E_{\max} = f(S);$$

3 - E_H^* - напруженість виникнення самостійного розряду

формі. Чим біль неоднорідність електричного поля, тем більш ймовірність виникнення коронного розряду.

Лавинна форма виникає у електродів з малою кривизною (1-2 мм.) і має вигляд світного каналу у вузькому чохла.

При підвищенні початкової напруги, коли кількість електронів в лавині досягає $10^7 \dots 10^9$, вона переходить у плазму і у проміжку виникає стример у електрода з підвищеною напруженістю електричного поля. Але якщо в однорідному полі стример досягає протилежного електрода, то в різко неоднорідному полі стример може зупинитися на деякій відстані від стрижня. При цьому його плазма розпадається, але поблизу стрижня виникають нові стримери, тобто виконується умова самостійності розряду. При стримерному розряді структурна форма іонізації дискретна і світіння має вигляд розбіжних від основного каналу вузьких ниток.

Отже коронний розряд – це самостійний розряд, при якому ударна іонізація відбувається в локальній ділянці міжелектродного проміжку поблизу коронуючого електрода.

Для пробою всього між електродного проміжку необхідно підвищити початкову напругу. Тоді виникає канал, який переміщується від стрижня до протилежного електрода. При пересиченні іскровим каналом всього проміжку він перетворюється у *дуговий розряд*. Це визначає завершення пробою газового проміжку.

Таким чином види розряду газового проміжку є наступні (рис.2.10):

1. Іскровий розряд.

Він виникає при тиску декілька вище атмосферного. При цьому виникає канал іонізованого газу по якому роз поширюється електричний струм. При цьому газ в каналі сильно нагрівається, зростає його тиск, і розширюючись газ спотворює звукові хвилі, визиваючи тріск (коли іскра малих розмірів) чи грім (іскра у вигляді блискавки), а також випромінювання електромагнітних хвиль різної частоти (радіохвилі, інфрачервоне та ультрафіолетового випромінювання).



Рис.2.10 Основні види розряду в газах
а – іскровий; б – коронний; в – дуговий; г – тліючий

2. Коронний розряд

Він виникає у різко неоднорідних полях і супроводжується слабким освітленням в областях максимальної напруженості електричного поля (виступи електродів) і незначним шумом. Таке освітлення часто виникає на кінцях корабельних матч (вогні Ельма). Коронний розряд приводе до значних втрат електричної енергії.

3. Дуговий розряд

Він виникає у сильно неоднорідному полі, якщо металеві електроди спочатку з'єднати, а потім розвести на значні відстані. Дуговий розряд є продовженням коронного розряду при значних початкових напругах. Дуговий розряд супроводжується сильним нагрівом газу (до кілька тисяч градусів), та випромінює осліплююче світло. Приводе до значних втрат електричної енергії.

4. Тліючий розряд

Він виникає, коли тиск газу низький (від десятих долів до кількох одиниць мм.рт.ст.). Він випромінює слабе освітлення газу.

Таким чином, розрядна напруга в однорідному полі набагато вища, ніж в неоднорідному, що треба враховувати при конструюванні та обслуговуванні електрообладнання. Спосіб підвищення електричної міцності проміжків з неоднорідним полем полягає у регулюванні (вирівнюванні) електричних полів, а також у використанні ефекту полярності й бар'єрного ефекту.

2.1.6.1 Ефект полярності

У сильно неоднорідних полях, коли корона напруга значно менш розрядної напруги, полярність на несиметричних електродах значно впливає на значення розрядної напруги. В проміжку стрижень – площина формування розряду залежить від полярності стрижня.

Якщо на стрижні «плюс», то електрони від катода рухаються до анода. Потрапивши в зону різкого підвищення напруженості, вони прискорюються, випереджаючи об'ємний позитивний заряд, що спотворює поле в міжелектродному проміжку, і осідають на стрижні-аноді. Тоді як позитивні іони внаслідок повільного руху залишаються поблизу острого електрода утворюючи позитивний об'ємний заряд. У результаті напруженість поля E в гострого електрода зменшується, а напруженість у проміжку зростає (2.11 а). На ділянці АВ розподіл потенціалу різко неоднорідний, що призведе до іонізації і подальшого пробоя ділянки АВ при відносно незначних напругах.

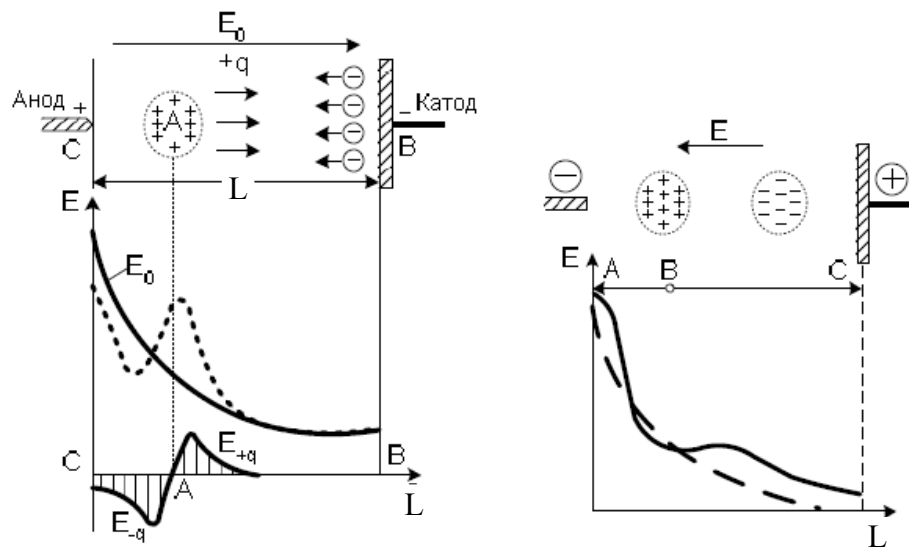


Рис.2.11 Розподіл напруженості в між електродному проміжку при різних потенціалах стрижневого електроду

Якщо напруга між електродами достатнє значна, то виникає лавина електронів праворуч від об'ємного заряду, електрони якій змішуючись з позитивними іонами об'ємного заряду, утворюють канал анодного стримера, який заповнений плазмою. Виникає стримерний коронний розряд. Позитивні іони, які розташовані у голові стримера утворюють область підвищеної

напруженості електричного поля. Наявність області сильного поля викликає формування нових лавин, електрони яких втягуючись в канал стримера, здовжують його, стример проростає до катода, викликаючи пробій проміжку при відносно малих значеннях розрядної напруги.

Якщо на стрижні «мінус», то електронна лавина виникає в тому ж обсязі поблизу стрижня. Однак стартова швидкість лавини ще більша, тому що градієнт потенціалу на ділянці АВ значно вищий. Електрони прямують до позитивного електрода, залишаючи за собою об'ємний позитивний заряд E_{+q} , утворений іонами. Потрапивши в ділянку малого градієнта ВС, вони різко

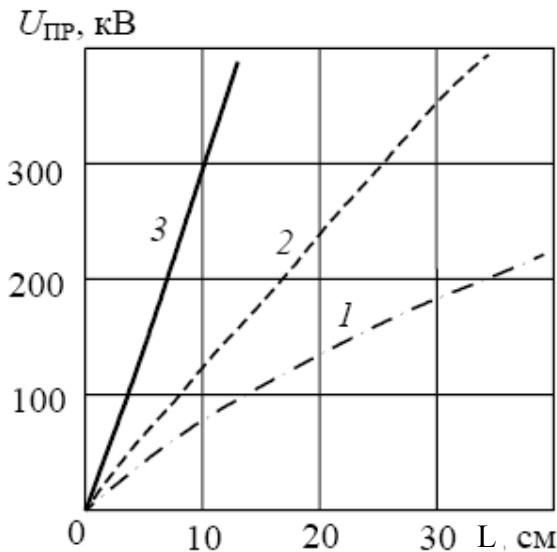


Рис. 2.12 Залежність пробивної напруги від відстані між електродами «стрижень – площина» при імпульсній напрузі:

1 - + на стрижні; 2 - - на стрижні;
3 - однорідне поле

гальмуються і захоплюються нейтральними молекулами газу, стають малорухомими негативними іонами, утворюючи малорухомий негативний об'ємний заряд E_q (рис.2.11 б). У стрижня (ділянка АВ) виникає різка неоднорідність поля, що зменшує напругу запалювання видимої корони. На основній розрядній ділянці ВС середнє значення градієнта напруженості вирівнюється і величина розрядної напруги різко (удвічі) збільшується. Це явище називається *ефектом полярності* й використовується для підвищення розрядної напруги в установках постійного струму (рис.2.12).

При змінній напрузі пробій завжди виникає в момент позитивної полярності на стрижні.

2.1.6.2 Бар'єрний ефект.

Ефективним засобом підвищення електричної міцності ізоляційних проміжків є використання бар'єрів. *Бар'єр* – це діелектрична пластина (папір, електрокартон), яку розміщують у міжелектродному проміжку перпендикулярно до силових ліній електричного поля.

При позитивній полярності на стрижні позитивні іони осідають на бар'єрі і розтікаються тім рівномірній, чим далі від стрижня знаходиться бар'єр. Це приводить до більш рівномірного розподілу напруженості електричного поля в проміжки, а від того і к значному зростанню розрядної напруги (рис.2.13 а).

При негативній полярності на стрижні електрони рухаючись від стрижня попадають на бар'єр, різко зменшують свою швидкість і більшість з них захоплюються нейтральними молекулами, утворюючи малорухомі негативні іони. На бар'єрі в цьому випадку виникає концентрований негативний заряд,

який підвищує напруженість електричного поля не тільки в проміжку «стрижень

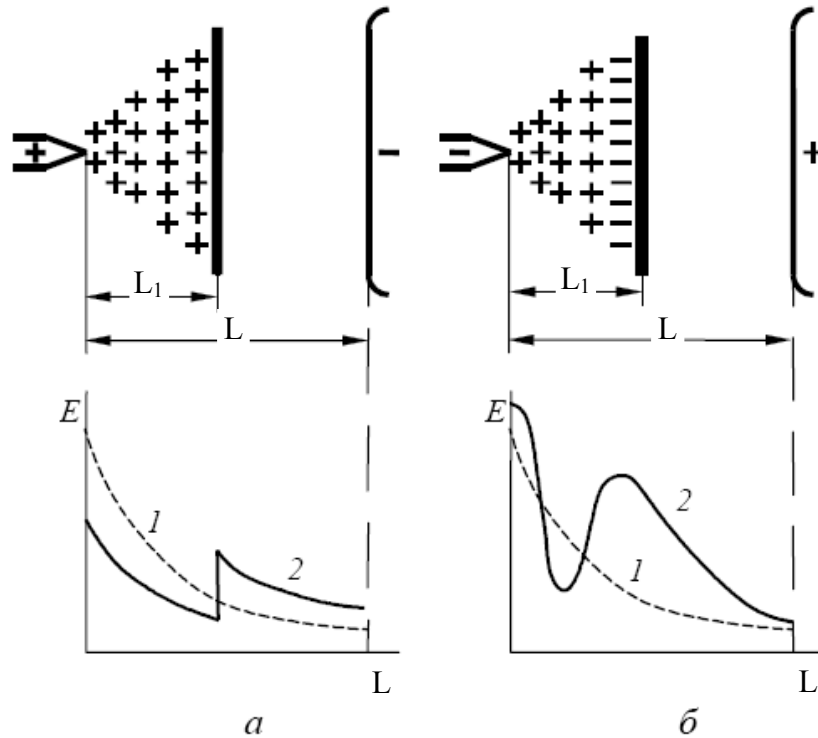


Рис. 2.13 Розподіл напруженості електричного поля в між електродному проміжку при наявності бар'єру:

а - + на стрижні; б - - на стрижні;

1 – розподіл полю без бар'єру; 2 – розподіл полю з бар'єром.

– бар'єр», а також на проміжку «бар'єр – площина» (рис.2.13 б). Тому в цьому випадку збільшення розрядної напруги буде незначною.

Слід зауважити, що електрична міцність проміжку з бар'єром суттєво залежить від відстані бар'єру до коронуючого електроду. Якщо бар'єр розташований у середині проміжку, то розрядні напруги будуть практично однакові, як для позитивної, так і негативної полярності на стрижні.

При розташуванні бар'єру поблизу позитивного стрижня його роль зменшується в наслідок різкої нерівномірності розподілу зарядів на бар'єрі.

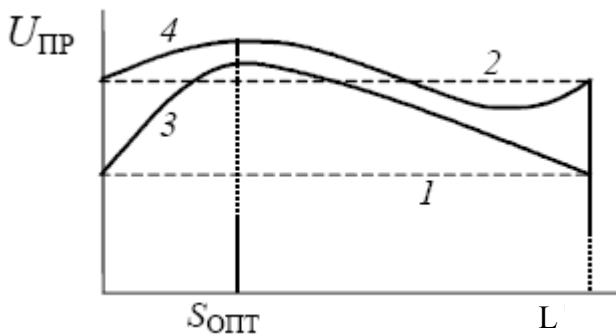


Рис. 2.14 Вплив бар'єру на пробивну напругу газового проміжку при негативній (1,3) і позитивній (2,4) полярності на стрижні:

1, 2 – пробивна напруга без бар'єру;
3, 4 – пробивна напруга з бар'єром.

Напруженості полю буде достатньо, щоб іонізаційні процеси проходили з другої сторони бар'єру.

Найбільша електрична міцність спостерігається при розташуванні бар'єру на відстані $S_{опт} = (25...30) \%$ від довжини проміжку, що дозволяє при позитивної полярності стрижня збільшити розрядну напругу до 2 рази (рис.2.14).

На змінній напрузі електрична міцність при позитивної полярності на стрижні наближається до електричній

міцності при негативній полярності на стрижні.

Таким чином, як постійна, так і змінна напруги стосовно тривалості розвитку розряду ($\sim 10^{-6}$ с.) є *довгодіючими*, оскільки напівперіод напруги частоти 50 Гц складає 10^{-2} с. Тому характер напруги в однорідному полі не впливає на процеси розвитку розряду. Якщо поле неоднорідне, то визначальною є найменша розрядна напруга, обумовлена ефектом полярності (+ на коронуючому електроді).

Явище бар'єрного ефекту поширено використовується при конструюванні комбінованої внутрішньої ізоляції (маслобар'єрна, паперово-масляна).

2.1.7 Вплив часу дії напруги на пробій газової ізоляції

При короткочасних імпульсах значення розрядної напруги газів залежить від тривалості дії зовнішнього іонізуючого імпульсу (наприклад, блискавка). Якщо до проміжку прикладена достатня для розряду напруга, то для розвитку та

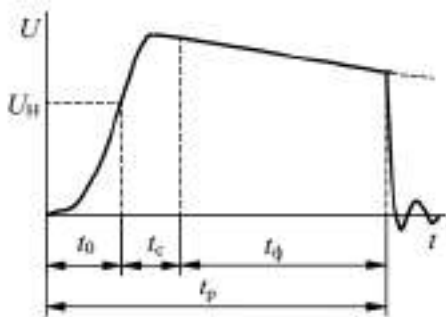


Рис.2.15 Часова структура розвитку розряду при імпульсній напрузі

завершення розряду проміжку необхідне деякий час t_p , який зветься часом розряду (рис.2.15).

Розвиток самостійного розряду починається з появи в проміжку початкового ефективного електрона, що є випадковою подією. Час очікування ефективного початкового електрона t_c має деяке відхилення, тому зветься статистичним часом запізнювання розряду. Другою

складовою, яка також має статистичний характер є час формування розряду t_ϕ , тобто час від моменту появи початкового електрона до завершення пробою. Таким чином, в загальному випадку час розряду проміжку складає:

$$t_p = t_0 + t_c + t_\phi \quad (2.22)$$

де t_0 - час зростання напруги до пробивного значення U_H .

При підвищенні напруги час t_c і t_ϕ скорочується, чим вище розрядна напруга, тем менш час розряду.

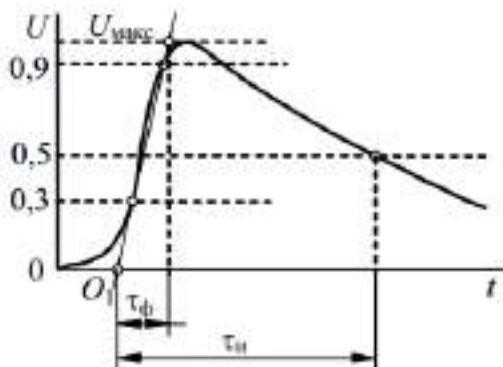


Рис.2.16 Визначення параметрів стандартного імпульсу напруги

Залежність максимальної напруги розряду від часу дії імпульсу зветься вольт-секундною характеристикою (ВСХ) ізоляції. З метою уніфікації при порівнянні характеристик ізоляції встановлений стандартний грозовий імпульс (рис.2.16), який має наступні параметри:

- тривалість фронту імпульсу $t_\phi = 1,2 \pm 0,36$ мкс,
- тривалість самого імпульсу : $t_i = 50 \pm 10$ мкс;

- амплітуда імпульсу : $I_0 \approx 30 \div 200$ кА;
- крутизна фронту імпульсу : $\partial I_0 / \partial t = 13 \div 30$ кА/мкс.

Оскільки початок і швидкість протікання процесу іонізації залежать від величини U_n , то ВСХ залежить від форми імпульсу (рис.2.17).

Через статистичний розкид терміну розряду t_p ВСХ має вигляд смуги, для якої вказують середню криву, а її ширина визначає межі розкиду величини розрядної напруги (для трьох різних імпульсів). ВСХ також суттєво залежить від ступеня однорідності електричного поля (рис.2.18).

Для проміжків з однорідним чи слабо неоднорідним полем ВСХ слабо залежить від часу розряду, за винятком часу розряду менш 1 мкс, що пов'язано з малим часом для формування первинної електронної лавини.

Для проміжків з різко неоднорідним полем ВСХ має значну більшу крутизну, оскільки в таких проміжках час формування розряду значно залежить від прикладеної напруги.

ВСХ поширено використовують для координації ізоляції, тобто для захисту від впливу грозових та комутаційних перенапруг.

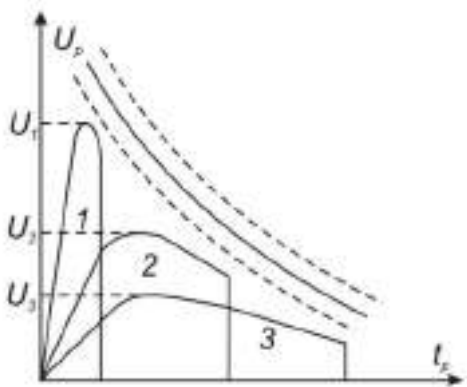


Рис. 2.17 Залежність величини розрядної напруги U_p ізоляції від тривалості дії імпульсу перенапруги t_p :

- 1 – короткий імпульс ;
- 2 – середньо тривалий;
- 3 – довготривалий

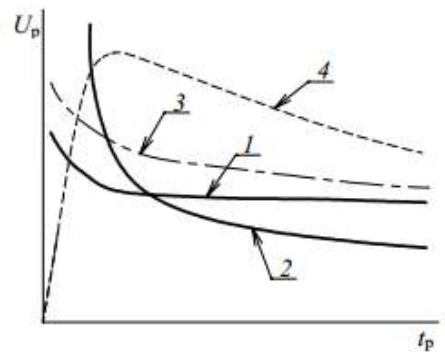


Рис.2.18 Вольт-секундна характеристика захисних розрядників та ізоляції:

- 1 – однорідне поле; 2 – різко неоднорідне поле;
- 3 – ВСХ захищеного об'єкту; 4 – імпульс напруги

2.1.8 Вплив поверхні твердого діелектрика на розвиток розряду

Внесення твердого діелектрика в повітряний проміжок може істотним чином змінювати умови і механізм розвитку розряду. Величина розрядної напруги при цьому знижується і залежить від тиску газу і форми електричного поля, властивостей твердого діелектрика, стану його поверхні і розташування її відносно силових ліній електричного поля. Розряд уздовж поверхні діелектрика називається **поверхневим розрядом**. Закономірності розвитку розрядів уздовж поверхні твердого діелектрика необхідно знати для раціонального конструювання ізоляторів, які є важливою складовою високовольтних ізоляційних конструкцій.

Розглянемо вплив твердого діелектрика на виникнення і розвиток розряду в повітрі уздовж поверхні ізолятора. У конструкції на рис.2.19 а силові лінії електричного поля практично паралельні поверхні твердого діелектрика і поле є практично однорідним. У конструкції на рис.2.19 б, поле неоднорідне і тангенціальна складова напруженості поля на поверхні діелектрика E_τ переважає над нормальною складовою E_n . У конструкції на рис.2.21 в полі також

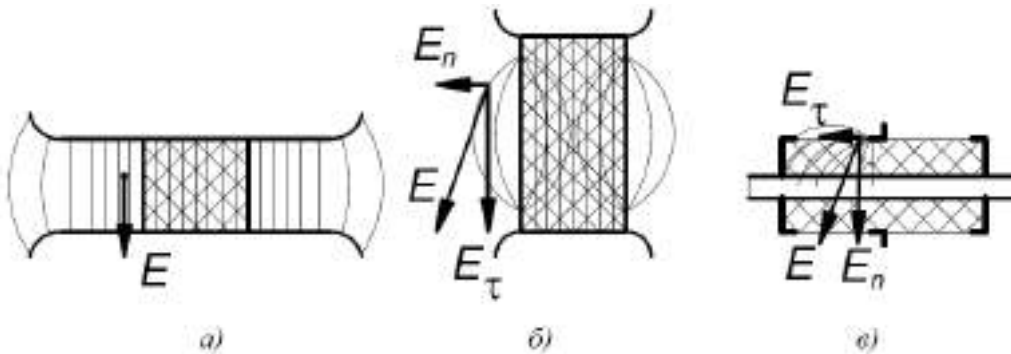


Рис.2.19 Характерні конструкції повітряних проміжків з твердим діелектриком::
 а – опорна з квазіоднорідним електричним полем, б – опорна з домінуванням тангенціальної складової електричного поля; в – прохідна з домінуванням нормальної складової електричного поля

неоднорідний, але переважає нормальна складова E_n . Друга і третя конструкції зустрічаються часто (опорні, рис.2.21 б, і прохідні рис.2.19 в, ізолятори).

В ізоляційній конструкції рис.2.19 а, електрична міцність проміжку з твердим діелектриком менша, ніж чисто повітряного проміжку (рис.2.20 а, крива 1). Це пов'язано з адсорбцією вологи з навколишнього повітря на поверхні діелектрика, а також з мікропроміжками між твердим діелектриком і металевим електродом в точці дотику. Поверхня усіх тіл в повітрі покрита щонайтоншою плівкою води. Іони, що утворюються в цій плівці під дією електричного поля, переміщуються до електродів. В результаті цього поле поблизу електродів посилюється, а в середині проміжку послаблюється. Посилення поля у електродів призводить до зниження електричної міцності проміжку. Це зниження тим більше, чим більш гігроскопічний діелектрик. Наприклад, скло є більше гігроскопічним матеріалом, ніж глазурований фарфор, тому напруга перекриття уздовж поверхні скла нижча, ніж уздовж фарфору (рис.2.20 а, криві 2 і 3). Зменшення напруги перекриття ізолятора за наявності мікропроміжку між діелектриком і електродом або мікротріщин на поверхні діелектрика пов'язане із збільшенням в них напруженості поля внаслідок відмінності діелектричної проникності повітря і твердого діелектрика (діелектрична проникність твердого діелектрика в 2...10 разів більша, ніж повітря). Збільшення напруженості поля в мікропроміжках призводить до іонізації і посилення поля в основному проміжку і зменшення напруги перекриття (рис.2.20 а, крива 4).

Для збільшення розрядної напруги проміжку з твердим діелектриком прагнуть використовувати малогігроскопічні діелектрики або утворюють покриття з малогігроскопічних матеріалів, що захищають діелектрик від контакту з парами води (наприклад, глазуровання поверхні фарфору), а також

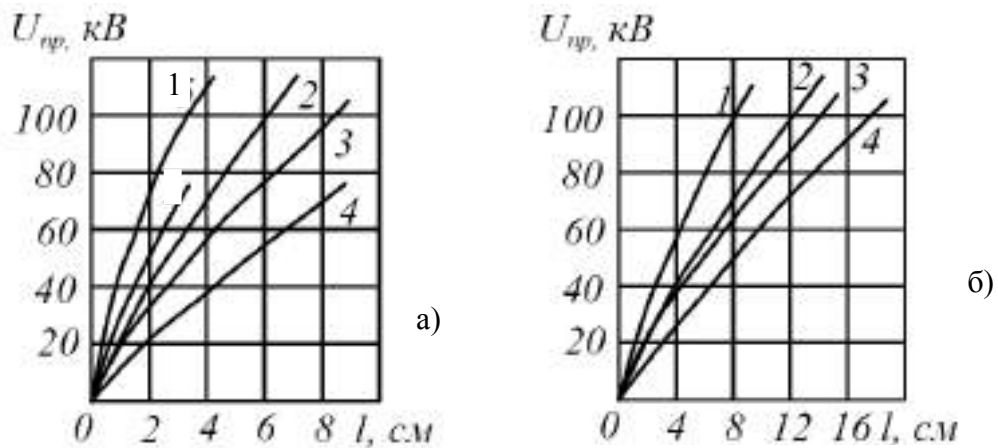


Рис.2.20 Залежність розрядної напруги по поверхні твердого діелектрика від проміжку між електродами для різних конструкцій та матеріалу ізолятора:
 а – опорна з квазіоднорідним електричним полем;
 б – прохідна з домінуванням тангенціальної складової електричного поля
 1 – тільки повітря; 2 – фарфор; 3 – скло ; 4 – нещільний контакт електрода (скло, фарфор)

забезпечити надійне, без мікропроміжків, сполучення тіла ізолятора з металевою арматурою, використовуючи цементні закладення і еластичні прокладення.

У ізоляційній конструкції на рис.2.19 б поле неоднорідне, отже, і у разі тільки повітряного проміжку розрядна напруга менша, ніж в однорідному полі. Вплив гігроскопічності діелектрика і мікропроміжків тут якісний такий самий, як і в конструкції на рис.2.19 а, але воно слабкіше виражене, оскільки електричне поле і без того істотно неоднорідне (рис.2.20 б).

Загальний вигляд залежності напруги перекриття ізолятора з домінуванням тангенціальної складової має вигляд

$$U_P = a + bL \quad (2.23)$$

де a, b - експериментальні коефіцієнти;

L - відстань між електродами (фланцями).

З цієї залежності, що для збільшення розрядної напруги по поверхні ізолятора необхідно збільшувати довжину шляху розряду L , наприклад за рахунок оброблення поверхні.

При досить великій неоднорідності поля в цій ізоляційній конструкції, як і в чисто повітряному проміжку, виникає коронний розряд. При цьому утворюються озон і оксиди азоту, які впливають на твердий діелектрик. Найбільшу небезпеку коронний розряд представляє для полімерної ізоляції, особливо якщо він має стримерну форму. Температура стримеру досить висока, і зіткнення його з поверхнею діелектрика може привести до термічного розкладання діелектрика і утворення обвугленого сліду з підвищеною провідністю. Довжина цього сліду (треку) з часом зростає, що призводить до перекриття ізолятора з безповоротною втратою ним електричної міцності.

Усе сказане справедливо і для конструкції на рис.2.19 в. Велика нормальна складова електричного поля сприяє зближенню стримеру з поверхнею діелектрика, що підвищує вірогідність ушкодження діелектрика. Електрична міцність цієї конструкції ще менша, ніж конструкції на рис.2.19 б. Стримери, що розвиваються уздовж поверхні діелектрика, мають значно більшу ємність по відношенню до внутрішнього (протилежного) електроду, чим в конструкції з переважанням тангенціальної складової поля. Тому через стримери протікає порівняно великий струм. При певному значенні напруги струм зростає настільки, що температура газу в стримерах стає достатньою для термічної іонізації. Термічно іонізований канал розряду, що розвивається уздовж діелектрика, на поверхні якого нормальна складова напруженості поля перевищує тангенціальну складову, називають каналом **ковзаючого розряду** (рис.2.21)

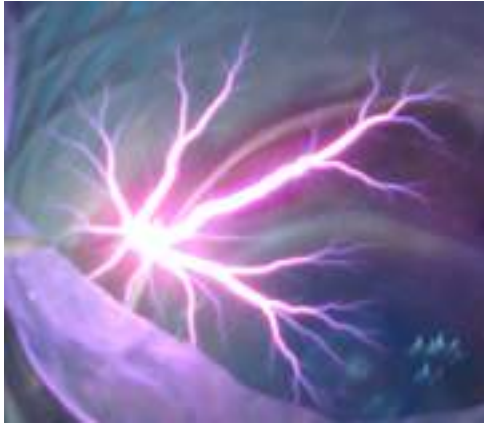


Рис.2.21 Зовнішній вигляд ковзаючого розряду

Оскільки провідність каналу ковзного розряду значно більша за провідність каналу стримера, то падіння напруги на ньому менше, і вся напруга виявляється прикладеною до непровідної частини між електродного проміжку. Це призводить до подовження каналу ковзного розряду і повного перекриття ізолятора при меншому значенні напруги між електродами..

У загальному випадку довжина ковзаючого розряду l_k залежить від напруги між електродами U , ємності каналу стримера C , зміни напруги в часі згідно емпіричній формулі Темплера:

$$l_{CK} = \chi_1 \cdot C^2 \cdot U^5 \cdot \sqrt[4]{\frac{dU}{dt}} \quad (2.24)$$

де χ_1 - коефіцієнт, який визначають експериментально.

C – питома поверхнева ємність (ємність одиниці поверхні діелектрика).

Підставимо у формулу (2.24) замість значення l_{CK} відстань між електродами по поверхні діелектрика L і знайдемо величину напруги перекриття ізолятора U_p . Приймаючи що конденсатор ізолятора плоский, тобто $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$, де S - площа поверхні ізоляції, d – товщина діелектрика, $\frac{dU}{dt} = const$ – крутизна імпульсу напруги, тоді маємо значення розрядної напруги у вигляді формули Тейлера:

$$U_p = A \cdot L^{0.2} \cdot \left(\frac{d}{\epsilon \epsilon_0} \right)^{0.4} \cdot \frac{1}{S^{0.4}} \quad (2.25)$$

Звідки випливає, що збільшення довжини ізолятора мало підвищує розрядну напругу, (рис.2.22). Тому для підвищення U_p прохідних ізоляторів зменшують питому поверхневу ємність за рахунок збільшення діаметра ізоляторів біля фланця, з якого можна чекати розвитку розряду. Необхідно

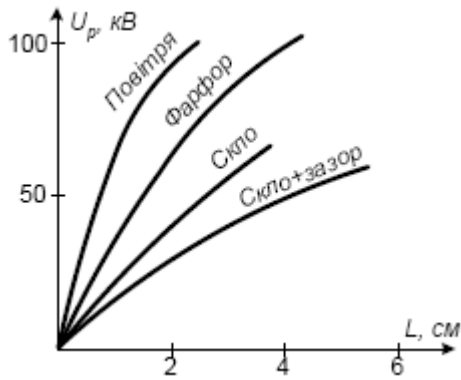


Рис. 2.22 – Залежність поверхневої розрядної напруги від відстані між

також використовувати матеріали з малою діелектричною проникністю ϵ , застосовувати напівпровідникові покриття між фланцем і діелектриком, що сприяє рівномірному розподілу напруги по поверхні ізолятора. При постійній напрузі питома поверхнева ємність практично не впливає на розвиток розряду і поверхнева розрядна напруга ізолятора наближається до розрядної напруги чисто повітряного проміжку між електродами.

В умовах реальної експлуатації поверхні ізоляторів завжди забруднюються. Як правило сухі забруднення, які мають значний опір не впливають на розподіл напруги по поверхні

ізолятора і не знижують значно розрядну напругу. Якщо такі забруднення змочуються вологою (наприклад за рахунок роси), то це різко зменшує опір поверхні, приводить до перерозподілу напруг, і як результат до зниження розрядної напруги.

Розглянемо розвиток розряду коли поверхня ізолятора зволожена та забруднена. Під дією прикладеної до ізолятора напруги вздовж зволоженому шару забруднення проходить струм утікання, який нагріває його. Оскільки забруднення розташовано не рівномірно, щільність струму утікання буде теж не рівномірною, тобто нагрів шару забруднення буде нерівномірним. На ділянках, де щільність струму підвищена виникають ділянки підсушеного бруду з великим опором. Тоді вся напруга, яка прикладена до ізолятора буде прикладена до цих підсушених ділянок бруду. В наслідок цього підсушені ділянки перекриваються іскровими каналами, які звуться *частковими дугами*. В області цих дуг струм утікання наростає в наслідок локального підвищення температури, що приводить до подальшого під сушення шару бруду, тобто подальшому підвищенню його опору.

Цей процес приводить до збільшення довжини розрядних дуг і в результаті до перекривання усього ізолятора, тобто розряд пройде по шару бруду. Процес виникнення часткових дуг випадковий. Він залежить від діючої напруги, типу бруду, ступені його зволоження, геометричної форми ізолятора і т.п.

З наведеної картини розвитку розряду слідує, що розрядні напруги ізоляторів будуть тим вище, чим менш струми утікання:

$$I_y = \frac{U}{R_y} \quad (2.26)$$

де I_y - струм утікання:

R_y - опір утікання по поверхні діелектрика.

Якщо шар забруднення має товщину Δ з питомим об'ємним опором ρ , то для циліндричного гладкого ізолятора діаметром D :

$$R_y = \frac{\rho \cdot L_y}{\pi \cdot \Delta \cdot D} \quad (2.27)$$

де L_y - довжина утікання.

Тоді:

$$I_y = \frac{U \cdot \pi \cdot \Delta \cdot D}{\rho \cdot L_y} \quad (2.28)$$

Тобто розрядна напруга ізолятора буде наростати зі збільшенням шляху утікання та зменшенням діаметру ізолятора згідно:

$$U_p = \frac{I_y \cdot \rho \cdot L_y}{\pi \cdot \Delta \cdot D} \quad (2.29)$$

Оскільки процеси осушення поверхні ізолятора проходять відносно повільно, то при короткочасних перенапругах вони не встигають розвинути і напруга перекриття буде вища, ніж при тривалій дії напруги.

Основним заходом з підвищення експлуатаційних характеристик ізоляторів в умовах інтенсивного забруднення і зволоження є їх обмив, очищення, а також застосування гідрофобних покриттів. Найменш трудомістким заходом є обмив ізоляторів водою, але не всі види забруднень піддаються такому способу очистки. Гідрофобні покриття у вигляді твердих плівок або в'язких покриттів (кремнійорганічний вазелін КВ-3) дають змогу більш якісно здійснювати чистку й збільшити інтервал між ними. Більш ефективними є в'язкі покриття, оскільки вони не тільки відштовхують вологу, але й поглинають частки бруду, не даючи їм утворювати провідного шару. Звичайно гідрофобні покриття зберігають дієздатність 1,5 – 2 роки.

2.2 Пробій рідких діелектриків

2.2.1. Фізична природа розряду в рідких діелектриках

Рідкі діелектрики, маючи більш високу електричну міцність у порівнянні з газами, знайшли поширене використання як високовольтна ізоляція в різноманітних пристроях: трансформаторах, кабелях, конденсаторах, вимикачах, розрядниках та т.п.

Рідкі діелектрики розділяються на природні, до яких відносяться різноманітні масла, і синтетичні (кремнійорганічні сполуки). Електрична міцність масла (трансформаторного, кабельного, конденсаторного) наближається до міцності твердих діелектриків (~ 200 кВ/см). Крім того, рідкі діелектрики мають добру теплопровідність, що дозволяє ефективно відводити тепло від струмопровідних частин електрообладнання, які в процесі роботи нагріваються струмами навантаження та утікання. Ще одна їх цінна якість полягає у спроможності гасити дугу, яка виникає при комутації обладнання, або при пошкодженнях ізоляції. Застосування рідких діелектриків обмежує безпосередній вплив повітря і вологи на елементи конструкції електрообладнання.

Вплив електричного поля E на рідкий діелектрик призводить до дисоціації його і домішків на позитивні й негативні іони. При підвищенні

температури дисоціація прискорюється. Підвищення напруги в однорідних електричних полях призводить до виникнення окремих пробоїв в найбільш слабких місцях рідкого діелектрика і переходу в стійкий розряд у вигляді дуги при подальшому підвищенні напруги до розрядної. У нерівномірних полях спочатку виникає стримерна корона біля одного або обох електродів, яка при підвищенні напруги подовжується і переходить потім у стійкий розряд.

На пробій рідких діелектриків значно впливають багато факторів, які можуть як знижати пробивну напругу (волога, бруд та ін.), так і підвищувати її (очистка, тиск, наявність бар'єрів та ін.). Основні фактори, які впливають на пробивну напругу рідких діелектриків наступні:

1. Забруднення та зволоження – незначна кількість води (<0,03 %) різко знижує пробивну напругу, а підвищення забруднення також значно знижує її.
2. В'язкість – зменшення в'язкості зменшує пробивну напругу.
3. Температура – з підвищенням температури пробивна напруга зменшується, хоча характер залежності $U_{ПР} = f(T)$ носить складний характер.
4. Тиск – збільшує пробивну напругу, оскільки збільшується тиск в газових бульбашках.
5. Наявність бар'єрів – значно підвищують пробивну напругу, особливо в різко неоднорідному електричному полі.
6. Час дії напруги – підвищення часу дії напруги зменшує пробивну напругу: чим менш забруднений діелектрик, тем менш цей вплив.
7. Форма, площа електродів та відстань між ними – впливає на неоднорідність поля: чим більш неоднорідність електричного поля, тем менш пробивна напруга. Збільшення відстані між електродами підвищує пробивну напругу.
8. Полярність електродів при їх несиметричній формі – при негативній полярності на стрижні пробивна напруга вище, ніж при позитивній полярності.

Пробій рідких діелектриків це складне явище, що пов'язано з складним складом рідких діелектриків і значною кількістю факторів, які впливають на їх пробій. Існуючі теорії розряду в рідких діелектриках не дозволяють оцінити їх вірогідність кількісно, тому треба орієнтуватися перш за все на експериментальні дані. Для добре очищених рідких діелектриків електрична міцність може досягати 1000 кВ/см.

Розглянемо вказані фактори впливу більш детально на прикладі трансформаторного масла, електрична міцність якого може досягати 320 кВ/см..

2.2.2 Вплив води та мікродомішок

Волога в трансформаторному маслі може знаходитися у трьох станах: молекулярно-розчиненому, у вигляді емульсії (дрібні шарики води розміром 2...10 мкм) та у вигляді осаду води на дні баку. Розчинність води в малі

значно залежить від температури. Якщо молекулярно-розчинна вода мало впливає на електричну міцність масла, то навіть частки емульсійної воді різко знижують його міцність. Це пояснюється поляризацією краплинок вологи ($\epsilon_{\text{води}} = 80$, тоді як $\epsilon_{\text{масла}} = 4 \dots 7$) в електричному полі і утворенням внаслідок цього провідних місточків, по яких відбувається розряд.

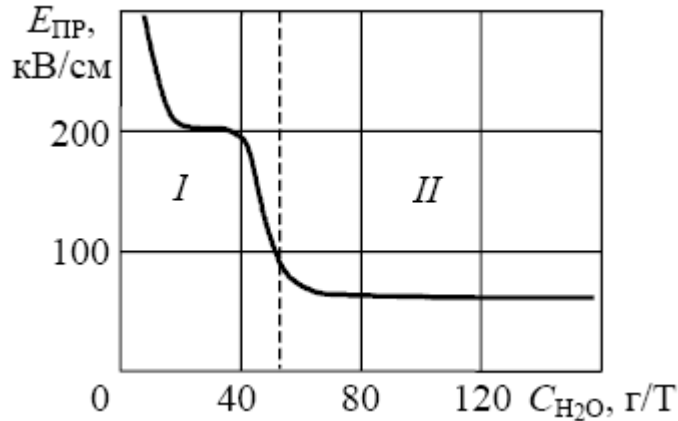


Рис.2.23 Залежність електричної міцності трансформаторного масла від концентрації вологи (грам/тону):
1 – зона розчиненої вологи; 2 – зона емульсійної вологи

Залежність пробивної напруги трансформаторного масла від концентрації в ньому вологи показує, що в області малих концентрацій вологи зниження пробивної напруги пов'язано з впливом розчиненої вологи, а в області великих концентрацій – емульсії вологи (рис.2.23).

Загальна кількість вологи в молекулярно-розчиненому вигляді, або у вигляді емульсії залежить від температури та обмежена. Звичайно при концентрації вологи більш 0,02 %

волога випадає в осадок, який хоч і не впливає на електричну міцність, але є індикатором погіршення ізоляційних властивостей масла.

Значно різке зменшення пробивних напруг виникає при наявності у маслі гігроскопічних забруднень у вигляді волокон паперу, картону, ткани, які проникають у масло в процесі експлуатації

2.2.3 Вплив тиску

Пробивна напруга як технічних так і очищених рідких діелектриків при

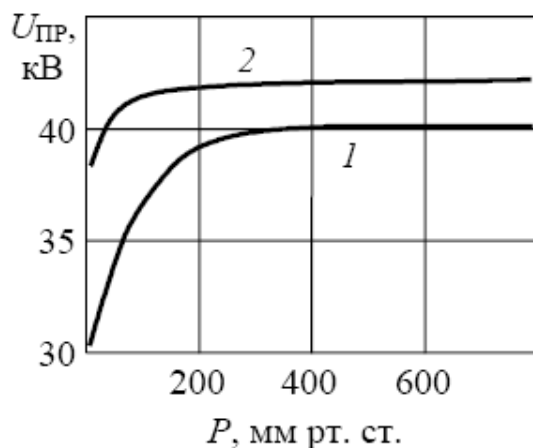


Рис.2.24 Залежність пробивної напруги трансформаторного масла від тиску:
1 – не дегазоване масло;
2 – дегазоване масло

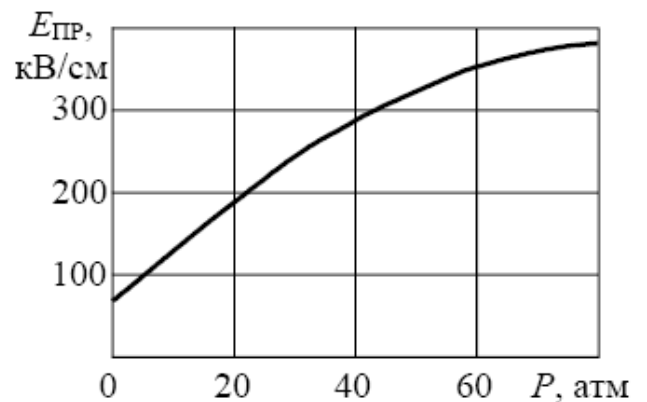


Рис.2.25 Залежність електричної міцності парафінового масла від тиску:

промислової частоти 50 Гц значно залежить від тиску. Це пов'язано з наявністю і виникненню бульбочок газу, які є очагами розвитку пробою, а згідно закону Пашена, електрична міцність газу значно залежить від тиску. При зниженому тиску з масла починають виділятися бульбочки розчиненого в маслі газу і його електрична міцність різко зменшується (рис.2.24). З підвищенням ступені очищення масла пробивна напруга зростає, що вказує на вплив газоподібних домішок. При тиску значно вище атмосферного електрична міцність масла зростає, що також говорить о наявності газу в маслі і його впливу на електричну міцність масла (рис.2.25).

2.2.4 Вплив температури

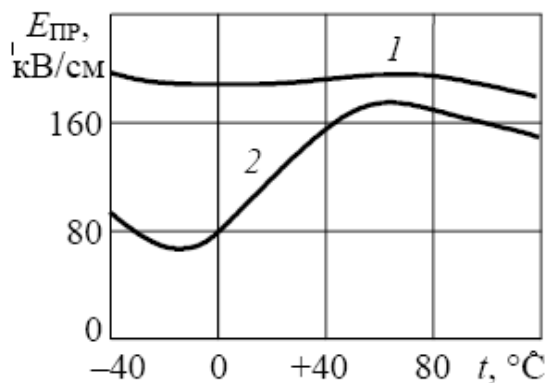


Рис.2.26 Залежність електричної міцності трансформаторного масла від температури:
1 – сухе масло;
2 – технічне масло з вологою

Для чистих рідких діелектриків значний вплив температури має місце в області інтенсивного випаровування і кипіння (рис.1.25, крива 1).

Для технічно чистих рідких діелектриків за залежність більш складна (рис.2.26, крива 2). Вона має мінімум і максимум електричної міцності. Зниження температури від максимуму до мінімуму призводить до зменшення електричної міцності, що пов'язане з переходом води у стан емульсії. При температурі нижче 0 °C вода вимерзає, що підвищує електричну міцність масла.

Зменшення електричної міцності при температурах вище +80 °C, обумовлено інтенсивним випаровуванням і кипінням рідкого діелектрика.

2.2.5 Вплив часу дії напруги

Електрична міцність рідких діелектриків в значній мірі залежить від часу дії напруги, причому збільшення забруднення підсилює цю залежність (рис.2.27). На цій залежності є як мінімум дві області, поява яких пов'язана з різними механізмами пробою.

При малому часу дії напруги (менш 10^{-4} с) вплив вологи та домішки значно послаблений, оскільки електрони поспівають за час дії напруги зміститися на значні відстані (область 1). Оскільки початкова стадія розвитку розряду починається при напруженості не менш 100 кВ/см, то починаються процеси електронної емісії з катоду, а також процеси автоіонізації рідини поблизу аноду. Всі ці процеси приймають участь у розвитку розряду.

Виникнення газових бульбашок у електрода має місце як в наслідок розкладання углеводородів, так і кипіння рідини під дією тепла в локальних зонах електрода. В таких газових бульбашках розвивається ударна іонізація,

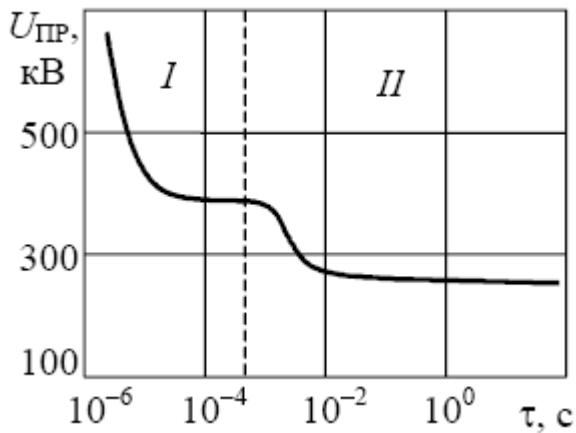


Рис.2.27 Залежність пробивної напруги трансформаторного масла від часу дії напруги. Електроди стрижень-площина. + на стрижні. Відстань між електродами 20 см.

рідкому діелектрику значно знижує пробивні напруги, причому найбільший вплив оказує емульсія вологи. Пробій настає в наслідок виникнення ланцюгів з дрібних поляризованих часток домішок, які витягуються вздовж силових ліній поля. Вони утворюють провідний канал, по якому протікає струм, що розігріває вологу та рідину поблизу електрода до кипіння, виникає газовий канал, по якому йде розряд.

2.2.6 Вплив геометрії електродів, відстані між ними та полярності

Геометрична форма електродів утворює поля різної неоднорідності, чим більш неоднорідність поля тем менш пробивна напруга, причому цей ефект проявляється більш сильно ніж для повітря. Збільшення відстані між електродами приводить до збільшення пробивної напруги (рис.2.28).

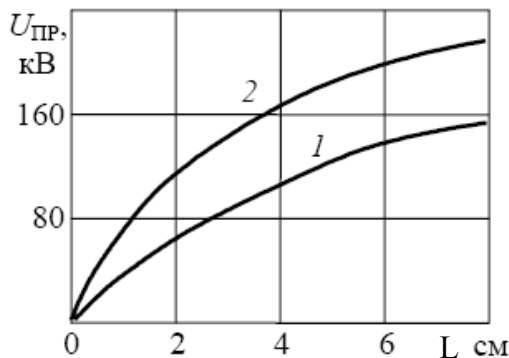


Рис.2.28 Залежність пробивної напруги трансформаторного масла від відстані між електродами. Електроди стрижень-площина. Напруга постійна:
1 – + на стрижні; 2 – – на стрижні

пов'язане з інтенсивністю емісії електронів з катоду.

Пробивна напруга залежить також і від полярності системи стрижень-площина. Більш ця залежність виявляється для полярних рідин.

виникає древоподібний стримерний канал, який розвивається до протилежного електрода.

Різке збільшення електричної міцності при часу дії менш 10^{-5} с пов'язане з запізненням розвитку розряду, коли час дії напруги приблизно дорівнює часу формування розряду. При збільшенні часу дії напруги до 10^{-3} с пробивна напруга швидко знижується в наслідок впливу вологи та волокон, а також виникненню газових бульбашок. При більшому часі дії напруги починається вплив теплових процесів на зниження пробивної напруги.

При довгій дії напруги (область II) наявність вологи, газу та забруднення в

На значення пробивної напруги впливає площа електродів та обсяг рідини. Підвищення площі та обсягу рідини знижує пробивні напруги. Стан електродів (забруднення, погана поліровка, окислення) також зменшують пробивні напруги. При збільшенні відстані між електродами вплив цих факторів на пробивну напругу зменшується, що

2.2.7 Бар'єрний ефект в рідких діелектриках

Для підвищення розрядних напруг U_p рідких діелектриків використовують бар'єри, тверді покриття і ізолювання електродів. При наявності бар'єрів пробивна напруга проміжку значно зростає. Це обумовлено двома факторами: бар'єр є непроникним для іонів рідини та бар'єр перешкоджає виникненню суцільних провідникових ланцюгів з волокнистих матеріалів. Дія бар'єру найбільш ефективна в нерівномірних електричних полях. При короткочасних імпульсних напругах дія бар'єрів менш ефективна ніж у постійних та змінних полях.

Бар'єр не проникний для іонів рідини, тому рухаючись від одного електрода до другого іони осаджуються на поверхні бар'єру, заряджаючи її та вирівнюючи електричне поле.

Розглянемо вплив бар'єру на електричну міцність проміжку з плоскими

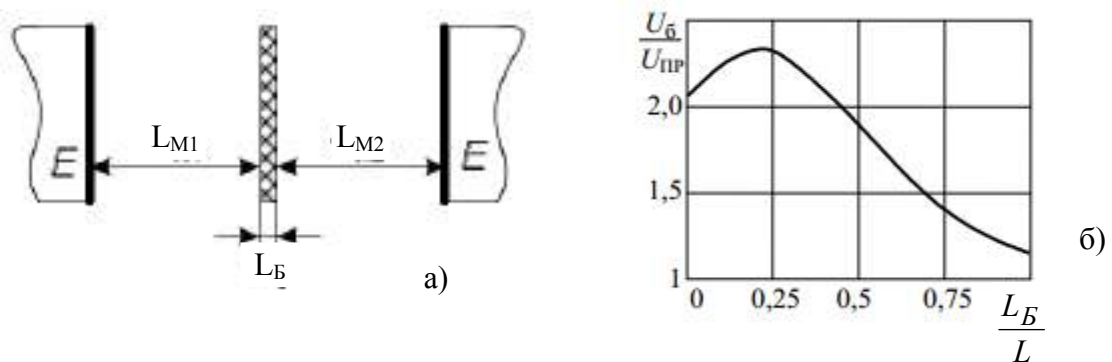


Рис.2.29 Схема бар'єрного проміжку (а) та вплив бар'єру на пробивну напругу трансформаторного масла (б).

Електроди стрижень-площина. Зміна напруга 50 Гц. Довжина проміжку $L = 75$ мм.

електродами (рис.2.29 а).

Без бар'єра напруженість у проміжку: $E_M = \frac{U}{L}$, і розрядна напруга: $U_P = E_M \cdot L$.

При наявності бар'єру $L_M = L_{M1} + L_{M2} + L_B$, та $\frac{E_M}{E_B} = \frac{\varepsilon_B}{\varepsilon_M}$ Тоді розрядна напруга:

$U_P = E_M \cdot L_M + E_B \cdot L_B$, а $L = L_M + L_B$.

Якщо прийняти що $\frac{\varepsilon_M}{\varepsilon_B} \approx 0,5$, то маємо

$$E_M = \frac{U_P}{L - 0,5 \cdot L_B} \quad (2.30)$$

Таким чином видно, що напруженість у маслі з бар'єром вища, ніж без нього. Розрядна напруга проміжку дорівнює: $U_B = E_M \cdot L \cdot (1-r)$, де r - частка товщини бар'єру L_B від загальної відстані L . При відсутності бар'єру розрядна напруга: $U_P = E_M \cdot L$, тобто електрична міцність вища з бар'єром на 30 ÷ 50%.

Якщо $r = \frac{1}{3} \dots \frac{1}{6}$, то:

$$U_{B\max} = 40 \cdot \left(1 + \frac{2,14}{\sqrt{L}}\right) \cdot L, \text{ [кВ]}. \quad (2.31)$$

Бар'єри найбільш ефективні, якщо розташовані нормально до силових ліній електричного поля, та при несиметричному проміжку.

На рис.2.29 б представлена залежність відносної зміни пробивної напруги $\frac{U_B}{U_p}$ від відносного положення бар'єру $\frac{L_B}{L}$, де L_B - відстань від стрижня до бар'єру для трансформаторного масла в несиметричному проміжку стрижень-площина при дії змінної напруги частотою 50 Гц. Бар'єр це електрокартон товщиною 5 мм. В даній системі координат пробивна напруга масляного проміжку без бар'єру дорівнює 1. Як можна бачити максимальний ефект відповідає відстані до бар'єру $L_B \approx 0,25 \cdot L$, що добре корелює з бар'єрним ефектом в газах.

Маслобар'єрна ізоляція поширено використовується в високовольтній техніці при виготовленні трансформаторів, вводів, реакторів та ін.

2.3 Пробій твердих діелектриків

Електрична міцність твердої ізоляції вища, ніж у рідкої та газоподібної: $U_{TB} > U_p > U_g$. Її значення залежить від наступних факторів:

- форми електричного поля в товщі діелектрика;
- типу напруги та полярності на несиметричних електродах;
- часу дії напруги;
- однорідності діелектрика – часткові розряди;
- електрофізичних характеристик діелектрика (полярний-неполярний, $\tan\delta, \varepsilon, \rho$ та ін.);
- температури.

У твердому діелектрику розділяють три види пробою:

- електричний пробій – електрична міцність $10^2 \dots 10^3$ кВ/мм;
- тепловий пробій – електрична міцність $10 \dots 10^2$ кВ/мм;
- старіння – електрична міцність $\sim 10 \dots 10^2$ кВ/мм та менш.

Тверда ізоляція включає до себе усі типи твердих діелектриків – від плівок до товстої монолітної ізоляції.

Найбільший вплив на електричну міцність впливає час прикладання напруги, температура довкілля та товщина діелектрику.

Залежність пробивної напруги від часу прикладання напруги наведена на рис.2.30.

На цьому графіку можна виділяти чотири ділянки. Ділянки I і II відповідають електричному пробою. Час прикладання напруги менш 0,1 с. Різке зростання розвитку розряду на ділянці I обумовлено затриманням розвитку розряду відносно часу прикладання напруги.

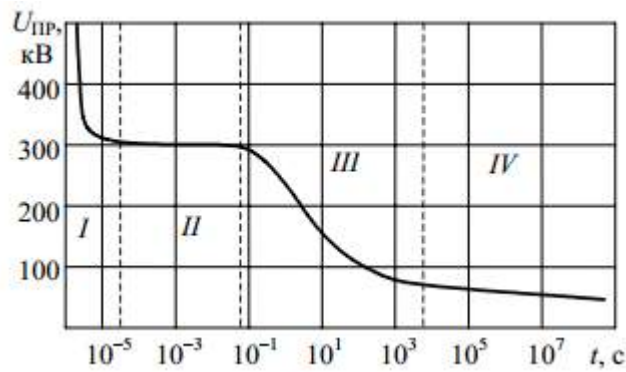


Рис.2.30 ВСХ твердої ізоляції:

I – електричний пробій, $t \ll 0,1$ с, запізнення розвитку каналу розряду;

II – електричний пробій, $t < 0,1$ с, не залежить від температури;

III – тепловий пробій, $t > 0,1$ с, різке зниження $U_{пр}$ у часі;

IV – старіння, $U_{пр}$ слабо зменшується у часі

Ділянка *III* характеризується різким спадом пробивної напруги, що говорить о домінуванні теплових процесів. На ділянці *IV* – зниження пробивної напруги зі зростанням часу впливу напруги, що пов'язано з повільними процесами старіння та деградації твердої ізоляції.

Слід відзначити, що електрична міцність твердої ізоляції зростає зі зменшенням її товщини особливо в області мікронних товщин (рис.2.31). Цей ефект, відкритий в 1928 р, використовується при ізоляції конденсаторів, кабелів, вводів та ін. для підвищення розрядної напруги. У цьому випадку ізоляція уявляє собою багатошарову конструкцію з дуже тонких шарів діелектрика.

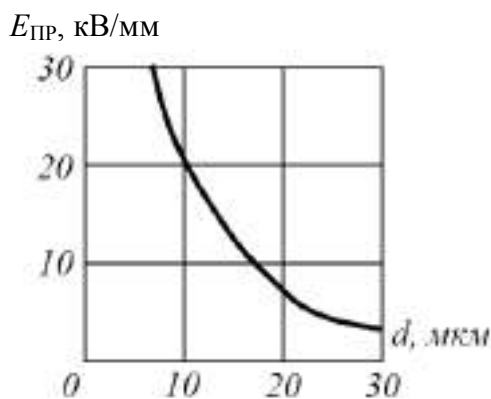


Рис.2.31 Залежність електричної міцності не просоченого паперу від товщини

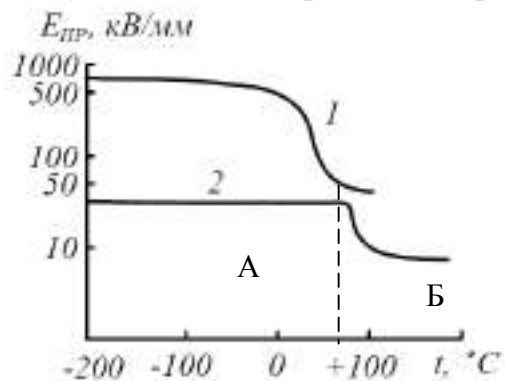


Рис.2.32 Залежність електричної міцності від температури для поліетилену (1) та фарфору (2)

Вплив температури ілюструє рис.2.32, де наведена залежність електричної міцності поліетилену та фарфору від температури. До 75 °C для фарфору або до 55 °C для поліетилену пробивна напруженість практично не залежить від температури (ділянка А). Подальше підвищення температури приводить до різкого зменшення електричної міцності в наслідок теплового пробою (ділянка Б).

Розвиток теплового пробою в твердому діелектрику можна пояснити в загальних рисах наступним чином:

$$U_D \rightarrow I_D \rightarrow T_D \uparrow \rightarrow \rho_D \downarrow \text{ та } \operatorname{tg} \delta \uparrow \rightarrow I_D \uparrow \rightarrow T_D \uparrow \rightarrow \dots$$

де U_D - напруга, яка прикладена до ізоляції;

I_D - струм, який протікає крізь ізоляцію;

T_D - температура ізоляції;

ρ_D - питомий опір ізоляції;

$\operatorname{tg} \delta$ - діелектричні втрати в ізоляції;

Нехай однорідний діелектрик з діелектричною проникністю ϵ , тангенсом кута діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta$ має форму паралелепіпеда з площиною S та відстанню між електродами d . До нього прикладена змінна напруга U . Температура середовища T_0 .

Тоді потужність діелектричних втрат, яка розігріває діелектрик

$$Q_1 = U^2 \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta_T. \quad (2.32)$$

За рахунок діелектричних втрат температура всередині діелектрика T зростає і стає вищою ніж середовища T_0 . Оскільки діелектричні втрати з температурою зростають, то

$$\operatorname{tg} \delta_T = \operatorname{tg} \delta_0 \cdot \exp [\alpha(T - T_0)]. \quad (2.33)$$

Ємність плоского конденсатора

$$C = \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S/d. \quad (2.34)$$

Із (2.32) - (2.34) маємо

$$Q_1 = U^2 \omega \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S \cdot \operatorname{tg} \delta_0 \cdot \exp [\alpha(T - T_0)] / d. \quad (2.35)$$

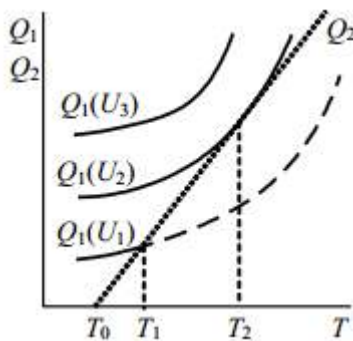


Рис.2.33 Зміння потужності нагріву Q_1 та потужності охолодження Q_2 в твердій ізоляції при різних значеннях змінної напруги.

Температура T за загальним об'ємом діелектрика однакова, оскільки товщина діелектрика мала, а теплопровідність не дуже мала.

Це тепло буде відводитися через металеві електроди, оскільки теплопровідність металу значно більша, ніж у діелектрика. Тоді потужність, яка відводиться від діелектрика можна розрахувати за формулою Ньютона:

$$Q_2 = 2 \cdot S \cdot \sigma_T \cdot (T - T_0), \quad (2.36)$$

де σ_T - коефіцієнт теплопередачі системи діелектрик - метал.

На рис. 2.33 наведена графічна залежність $Q_1=f(T)$ при різних значеннях напруги та $Q_2=f(T)$.

Після подання напруги U_1 $Q_2 < Q_1$, тому діелектрик почне грітися від температури середовища T_0 . При температурі T_1 $Q_2 = Q_1$, тобто в діелектрику встановиться рівноважна температура. Дійсно, якщо температура зросте випадково до T_4 , то $Q_2 > Q_1$ і діелектрик почне охолоджуватися до температури рівноваги T_1 . Але якщо температура з якогось приводу досягне T_2 , то це вже нестала рівновага, бо при $T > T_2$ $Q_2 < Q_1$ і діелектрик почне розігріватися доки не зруйнується. Напруга U_2 є максимальною при якій ще буде працювати діелектрик. При напрузі U_3 діелектрик зруйнується при будь-якій температурі.

Тому напруга U_2 може бути прийнята, як пробивна напруга, тобто.

$$Q_1 = Q_2, \quad (2.37)$$

$$d Q_1 / dT = d Q_2 / dT. \quad (2.38)$$

Використовуючи (2.35), (2.36), (2.37), (2.38) маємо

$$U^2 \omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S \cdot \operatorname{tg} \delta_0 \cdot \exp [\alpha(T - T_0)] / d = 2 \cdot S \cdot \sigma_T \cdot (T - T_0), \quad (2.39)$$

$$\alpha \cdot U^2 \omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S \cdot \operatorname{tg} \delta_0 \cdot \exp [\alpha(T - T_0)] / d = 2 \cdot S \cdot \sigma_T. \quad (2.40)$$

Розділивши (2.39) на (2.40) одержимо

$$1/\alpha = T - T_0. \quad (2.41)$$

Тоді з (2.41) та (2.39) маємо:

$$U_{PP} = K \cdot \sqrt{\left[\sigma_T \frac{d}{\alpha} \omega \varepsilon_0 \cdot \operatorname{tg} \delta_0 \right]}, \quad (2.42)$$

Із (2.42) виходить, що напруга теплового пробою буде вищою, коли умова тепловідводу вища (σ_T більша) та діелектрик товщі. При великих діелектричних втратах ($\operatorname{tg} \delta$ більше), великих частотах (ω більше) та більшому ε - пробивна напруга знижується.

Дуже складно визначити коефіцієнт теплопередачі σ_T . Тому часто використовують формулу Фока:

$$U_{PP} = 3.82 \cdot 10^5 \cdot [\lambda_T / (\alpha \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta_0)]^{1/2} \cdot \varphi(C), \quad (2.43)$$

де λ_T - коефіцієнт теплопровідності діелектрика, [Вт/м·К];
 $\varphi(C)$ - функція, значення якої залежать від параметру C :

2.3.1 Часткові розряди

Під впливом високої напруженості електричного поля в твердій ізоляції на ділянках з пониженою електричною міцністю (порожнини з газовими включеннями, включення бруду та іншого діелектрику з малою діелектричною проникністю та ін.) виникають часткові розряди, які уявляють собою пробій газових включень. Часткові розряди частіш всього не приводять до повного пробою діелектрика, але добре корелюють з розмірами та кількістю дефектів ізоляції. Тому вивчення характеристик часткових розрядів дозволяє оцінювати

якість твердої ізоляції, особливо багат шарової ізоляції, як при змінній, постійній, так і імпульсній напруги.

Для розгляді механізму виникнення часткових розрядів можливо використати еквівалентну схему заміщення твердого діелектрика з загальною ємністю C_E , який має газове включення (рис.2.34).

Звідси:

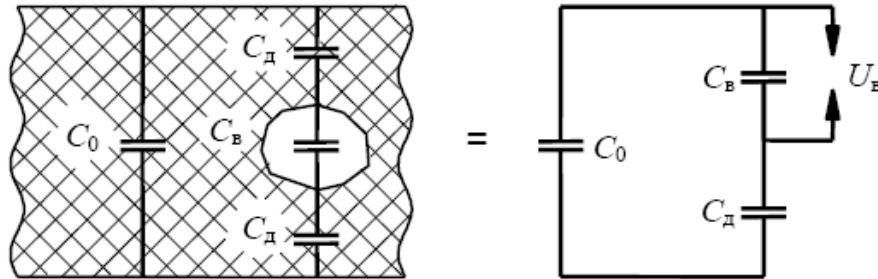


Рис.2.34 Схема заміщення твердого діелектрика з газовим включенням:

C_0 – ємність бездефектної ізоляції; C_B – ємність газового включення;

C_d – ємність діелектрика послідовно увімкненого з газовим включенням;

U_B – напруга пробою газового включення

$$C_E = C_0 + \frac{C_B \cdot C_d}{C_B + C_d} \quad (2.44)$$

Прийнято, що частковий розряд має частіше форму іскрового розряду, тому напруга в газовому включенні падає практично до нуля., а напруга на зразку зменшується на величину ΔU_X . Це приводить до зміни еквівалентного заряду на зразку на величину:

$$\Delta q_X = C_E \cdot \Delta U_X, \text{ [Кл]}, \quad (2.45)$$

яку часто називають *інтенсивністю іонізації*, оскільки вона залежить від ємності зразка C_E .

Частковий пробій виникне тоді, коли напруга на включенні досягне напруги запалення розряду в газовому включенні U_B .

Напруженість електричного поля у включенні пов'язана з напруженістю поля в решті діелектрика

$$E_B = E_d \cdot \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_B} \quad (2.46)$$

де E_d - напруженість електричного поля в твердому діелектрику;

$\varepsilon_d, \varepsilon_B$ - відносна діелектрична проникність твердого діелектрика та газового включення, відповідно.

Тоді напруженість електричного поля у газовому включенні буде вище ніж в решті твердого діелектрика ($\varepsilon_B < \varepsilon_d$), тобто виникне локальний пробій газового включення (частковий розряд). Тоді як в решті діелектрика пробій не виникне (рис.2.35). Чим вища діелектрична проникність твердого діелектрика, тем більш напруженість поля у газовому включенні і вище інтенсивність часткових розрядів.

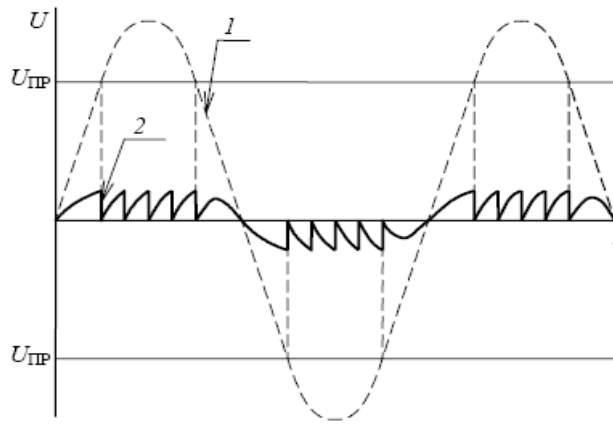


Рис.2.35 Епюри напруг на газовому включенні в твердому діелектрику:

1 – напруга на зразку; 2 – напруга на газовому включенні;

$U_{ГР}$ – напруга на зразку, при якій виникає пробій газового включення

Часткові розряди в газовому включенні виникають і зникають при змінній напрузі регулярно кожний напівперіод. При кожному розряді в його каналі розсіюється енергія $W_{чр}$, частка якої витрачається на руйнування ізоляції. Середня потужність регулярно виникаючих часткових розрядів визначається за формулою:

$$P_{чр} = n_f \cdot W_{чр} \quad (2.47)$$

де n_f - кількість часткових розрядів в одиницю часу.

Звідки випливає, що із збільшенням напруги кількість часткових розрядів і середня потужність зростають і, відповідно, зростає швидкість старіння ізоляції, і строк служби скорочується.

При розмірах включень десятки мкм та тиску близькому до атмосферного пробивна напруга лежить поблизу мінімуму кривої Пашена, слабо змінюється з розміром газових включень і складає близько 2500 ..3000 В.

Найбільш небезпечні часткові розряди на змінній та імпульсній напрузі. Руйнуюча дія часткових розрядів на тверду ізоляцію обумовлена наступними факторами, які виникають при пробії газового включення:

- дією ударних хвиль, які виникають в наслідок розширення газового включення при його пробію, що приводить до локального руйнування (старіння) твердої ізоляції;
- тепловою дією, що приводе до локального старіння твердої ізоляції;
- бомбардуванням атомів твердого діелектрика зарядженими частками, що сприяє розвитку пробію в твердому діелектрику;
- дією хімічно активних продуктів розряду (озон, окисли азоту та ін.) що приводе до старіння твердої ізоляції;

В залежності від середньої інтенсивності часткових розрядів вони підрозділяються на два типа:

- *початкові часткові розряди*. Вони виникають при перевищенні деякого порога напруги в ізоляції з інтенсивністю $10^{-12} \dots 10^{-11}$ Кл. Початкові

часткові розряди не сприяють швидкому руйнуванню твердої ізоляції, і часто допустимі.

- *критичні часткові розряди*. Вони виникають при подальшому зростанні напруги чи збільшенню розмірів газового включення, що приводе до збільшення інтенсивності часткових розрядів до $10^{-10} \dots 10^{-8}$ Кл. Це різко скорочує строк служби ізоляції. Критичні часткові розряди не можна допускати в процесі експлуатації ізоляції.

На рис.2.36 а наведений частковий розряд, який виникає у древоподібній порожнині твердої ізоляції – тріінгу, а також його вплив на руйнування ізоляції кабелю.



а)



б)

Рис.2.36 Розвиток часткового розряду в тріінгу (древopodobній порожнині твердої ізоляції) (а) та його вплив на ізоляцію кабелів середньовольтної напруги .

2.3.2 Регулювання електричних полів у внутрішньої ізоляції

Для надійної роботи внутрішньої ізоляції необхідно, щоб максимальна напруженість електричного поля не перевищувала допустимої величини: $E_{max} \leq E_{доп}$. Запишемо E_{max} через коефіцієнт неоднорідності електричного поля K_n і середню напруженість електричного поля $E_{ср} = U/d$ (U - робоча напруга; d – товщина ізоляції), і отримаємо:

$$\frac{U}{d} \cdot K_n \leq E_{доп} \quad \text{або} \quad d \geq \frac{U}{E_{доп}} \cdot K_n \quad (2.48)$$

Звідки виходить, що при заданій $E_{доп}$ необхідна товщина ізоляції пропорційна коефіцієнту неоднорідності поля, тобто товщина буде мінімальна, якщо поле однорідне. Тому необхідне використовувати будь які методи, які будуть вирівнювати електричне поля в ізоляції. Розглянемо деякі з цих методів

2.3.2.1 Використання багатошарових діелектриків

У конструкціях з паперово-масляною ізоляцією (наприклад кабелі) ефективним способом регулювання електричного поля є градирування ізоляції, яке реалізується комбінацією матеріалів з різними діелектричними проникностями ϵ , тобто комбінацією діелектричних матеріалів з різною діелектричною проникністю.

Внаслідок рівності потоків струмів зміщення крізь циліндричні поверхні радіусом r_1 і r_2 можна записати:

$$2\pi \cdot r_1 \varepsilon_0 \varepsilon_1 E_{\max} = 2\pi \cdot r_2 \varepsilon_0 \varepsilon_2 E_{\max} \quad (2.49)$$

де $E_{1\max}$, $E_{2\max}$ – напруженості поля у електрода радіуса r_1 і на циліндричній поверхні r_2 . З виразу (2.49) випливає, що при $E_{1\max} = E_{2\max}$:

$$r_1 \varepsilon_1 = r_2 \varepsilon_2 \quad (2.50)$$

Тобто якщо використати декілька ізоляційних матеріалів з різною діелектричною проникністю: $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$, так, щоб $\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > \varepsilon_3$, то розподіл напруженості поля буде більш однорідним (рис.2.37). Як видно з цього рисунку, при використанні однорідного діелектрика розподіл напруженості електричного поля від центральної жили кабелю до зовнішньої оболонки буде різко неоднорідним (крива 1). Якщо ж використати декілька ізоляційних матеріалів то розподіл напруженості поля буде більш однорідним (крива 2).

На практиці градирування паперово-масляної ізоляції кабелів здійснюють різними сортами паперу, які відрізняються щільністю. Найбільше значення ε має папір з більшою щільністю. У кабелях надвисокої напруги (500 кВ і більше) використовують 3...5 шарів паперу з різними значеннями діелектричної проникності ε .

2.3.2.2 Використання конденсаторних обкладинок

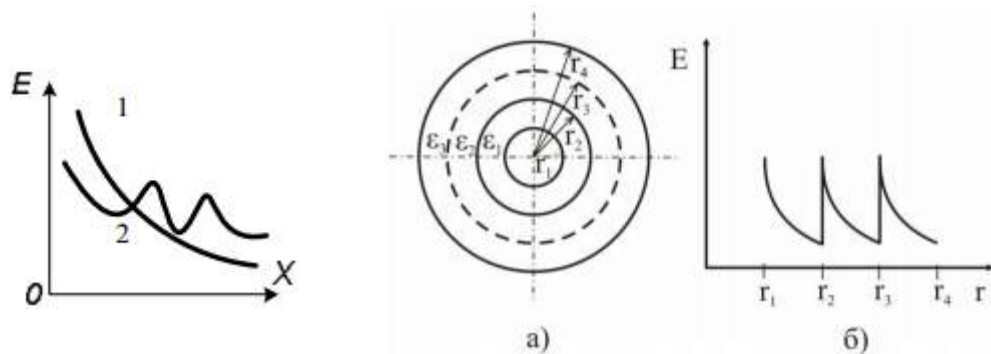


Рис.2.37 Регулювання електричного поля методом градирування ізоляції:
а – переріз кабелю; б – розподіл напруженості

Регулювати електричні поля в ізоляції можна також за допомогою конденсаторних обкладинок – додаткових електродів з металеві фольги, які розташовують в товщі ізоляції між основними електродами (рис.2.37). Завдяки зміні кількості, розмірів та взаємного розташування конденсаторних обкладинок можна змінювати ємності послідовно ввімкнених конденсаторів, що утворюють ці обкладинки, і здійснювати регулювання електричного поля.

Конденсаторні обкладинки можуть використовуватись для регулювання поля як в радіальному, так і осьовому напрямку (рис.2.38 а,б). Якщо прийняти, що максимальна напруженість поля між двома сусідніми обкладинками повинна бути однаковою, то розміри їх визначаються з умови: $r \cdot l = \text{const}$ де r – радіус, а l – довжина обкладинки.

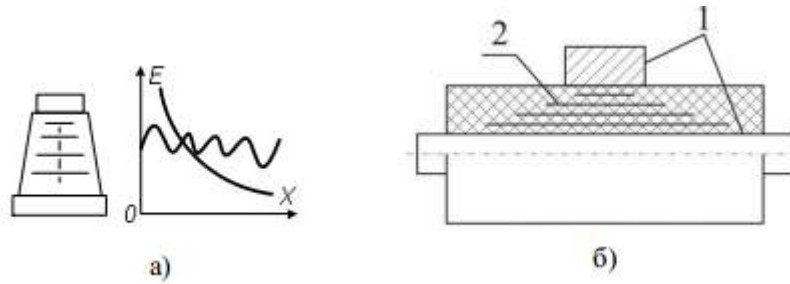


Рис.2.38 Регулювання електричного поля конденсаторними обкладинками:
а – опорний ізолятор; б – прохідний ізолятор;
1 – електроди; 2 – конденсаторні обкладинки

При достатній кількості обкладинок відстань між ними мала (2-4мм), тому різниця між напруженостями електричного поля незначна і в радіальному напрямку практично є постійною. За допомогою конденсаторних обкладинок можна регулювати електричне поле і у вводах з маслобар'єрною ізоляцією. При цьому обкладинки розташовують на бар'єрах циліндричної форми. Оскільки на краях обкладинок напруженість електричного поля досить значна, то збільшують радіус округлення країв обкладинок, наприклад, шляхом їх закрутки або розташування між краями додаткових електродів.

2.3.2.3 Використання напівпровідних плівок

Якщо електрод має гостру кромку і знаходиться в контакті з іншим видом ізоляції (газової, рідкої або твердої), напруженість електричного поля між ними зростає завдяки різним діелектричним проникностям ϵ цих матеріалів. Для запобігання цьому застосовують напівпровідні покриття, які дають змогу зменшити складову напруженості електричного поля E_x , спрямовану уздовж поверхні твердої ізоляції (рис.2.39).

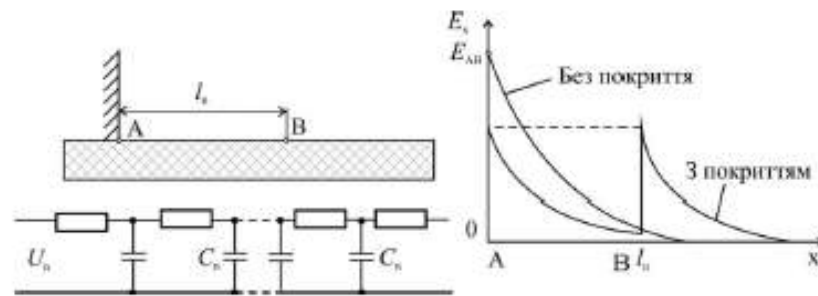


Рис.2.39 Регулювання електричного поля за допомогою напівпровідникових плівок.

Зміна потенціалу й напруженості E_x уздовж поверхні твердої ізоляції визначається питомим поверхневим опором ρ_s і питомою поверхневою ємністю $C_S = \frac{\epsilon\epsilon_0}{d}$ де d – товщина ізоляції. За допомогою схеми заміщення визначимо найбільшу напруженість у точці А: $E_A = \frac{U_0 \sqrt{\omega \rho_s \epsilon \epsilon_0}}{d}$. При

застосуванні напівпровідного покриття з поверхневим опором $\rho_n < \rho_s$ напруженість в точці A буде дорівнюватиме: $E_A = \frac{U_0 \sqrt{\omega \rho_n \varepsilon \varepsilon_0}}{d}$ - тобто зменшиться в $\sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_n}}$ раз. Таким чином можливе зниження неоднорідності електричного поля, яке має місце в прохідних ізоляторах.

Контрольні питання до розділу 2

1. Електрична міцність та електричні розряди в газовому середовищі.
2. Види об'ємної іонізації в газах.
3. Види поверхневої іонізації в газовому середовищі.
4. Що таке лавина електронів? При яких умовах вона виникає?
5. Умова виникнення самостійного розряду в газах.
6. Що таке стример? Умова виникнення стримеру в газах.
7. Закон Пашена для газів.
8. Особливості розряду в газах при неоднорідному електричному полі.
9. Основні види розряду в газовому середовищі. Наведіть умови, при яких вони виникають.
10. Ефект полярності в газовому проміжку.
11. Що таке бар'єрний ефект? Для чого він використовується?
12. Як впливає тривалість дії напруги на пробій газового проміжку?
13. Яким чином впливає поверхня твердого діелектрика на пробій газового середовища..
14. Фізична природа пробою рідких діелектриків.
15. Які фактори і яким чином впливають на пробій рідкого діелектрика?
16. Вплив вологи та мікродомішок на пробій рідкого діелектрика
17. Вплив тиску на пробій рідкого діелектрика
18. Вплив температури на пробій рідкого діелектрика
19. Вплив часу дії напруги на пробій рідкого діелектрика
20. Вплив геометрії електродів, відстані між ними та полярності на пробій рідкого діелектрика
21. Бар'єрний ефект в рідких діелектриках.
22. Які види пробою мають місце в твердому діелектрику? Поясніть їх природу.
23. Що таке часткові розряди? Поясніть їх природу та вплив на ізоляцію твердого діелектрика.
24. Поясніть процес регулювання електричного поля в твердому багатошаровому діелектрику.
25. Поясніть процес регулювання електричного поля в твердому діелектрику при використанні конденсаторних обкладень..

3. ВИСОКОВОЛЬТНА ІЗОЛЯЦІЯ

Ізолятори класифікують за чотирма ознаками:

- за напругою: *високовольтні* – на напругу більшу за 1000 В та *низьковольтні* – на напругу меншу за 1000 В.

- за родом установки: *зовнішня* ізоляція знаходиться контакті з атмосферою, тоді як *внутрішня* – у нутрі герметичного об'єму. Крім того ізоляцію розподіляють на зовнішнього встановлення (зовні приміщення) та внутрішнього встановлення (у нутрі приміщення та відділена від зовнішніх впливів).

- за призначенням: *апаратні*, які призначені для кріплення струмоведучих частин електроустаткування, апаратів і машин (прохідні ізолятори на баках трансформаторів) та *лінійні*, які призначені для кріплення ізоляції дротів ліній електропередач і електропроводів залізниці ;

- за конструкцією. За конструкцією апаратні поділяються на: опорні, прохідні, опорно-штирьові, стрижневі, опорно-стрижневі, у формі тяг, важелів, стрижнів. Лінійні поділяються на: штирьові й підвісні. Підвісні поділяються на тарілчасті й стрижневі.

Для ізоляції розділяють короткочасну пробивну напругу, яка діє на ізоляцію тільки короткий час (грозові та комутаційні імпульси), та тривалу пробивну напругу, яка діє на ізоляцію безперервно (до 20...30 років) без пробоїв.

В наслідок дії довготривалої напруги в ізоляції протікають процеси старіння. Причини цього наступні:

1. електричні – часткові розряди, зміна в процесі експлуатації питомого опору, діелектричних втрат.
2. теплові – прискорення хімічних реакцій, які впливають на склад речовини ізоляції, підвищення діелектричних втрат, зменшення питомого опору;
3. механічні – виникнення тріщин по поверхні та в об'ємі ізоляції, стомленість, руйнування ізоляції;
4. хімічні – окислення, перетворення хімічного складу речовини ізоляції та т.п.;
5. вплив зовнішніх факторів – вологість, ультрафіолетове випромінювання, температура, тиск та т.п.

Розглянемо основні типи високовольтних ізоляторів для різних призначень.

3.1 Високовольтні ізолятори

По призначенню високовольтні ізолятори підрозділяються на лінійні та стаціонарно-апаратні, які в свою чергу підрозділяються на опорні та прохідні.

3.1.1 Лінійні ізолятори

Лінійні ізолятори призначені для кріплення і ізолювання дротів та тросів повітряних ліній електропередач. За конструктивним виконанням вони підрозділяються на штирьові та підвісні.

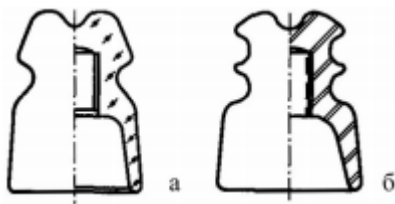


Рис.3.1 Деякі типи штирьових ізоляторів

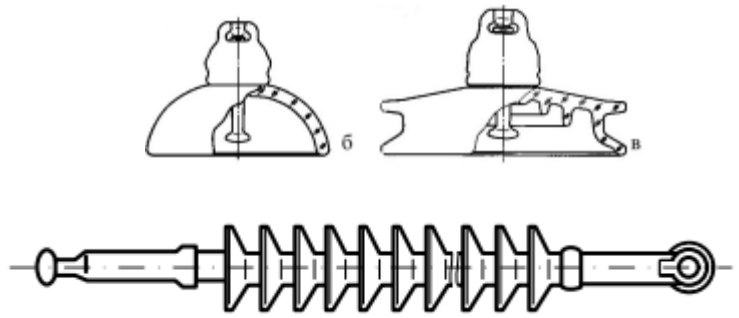


Рис.3.2 Деякі типи підвісних ізоляторів: тарілкові (зверху) та стержневі (знизу)

Штирьові ізолятори виготовляють з електротехнічного фарфору чи скла і монтують на опорах за допомогою штирів чи крюків. Деякі типові конструкції штирьових ізоляторів наведені на рис.3.1. Такі ізолятори навертаються на металевий штир, яких закріплюється на опорі. Кріплення дротів виконують у верхній частині ізолятора за допомогою дротової в'язки.

Підвісні ізолятори бувають тарілкові та стержневі. Їх виготовляють з електротехнічного фарфору чи скла. Деякі типові конструкції підвісних ізоляторів наведені на рис.3.2. В тарілковій конструкції ізолятор закріплюється за допомогою замка на опорі. Кріплення дротів виконується до сталюого стрижня, який знаходиться у центральній частині ізолятора.

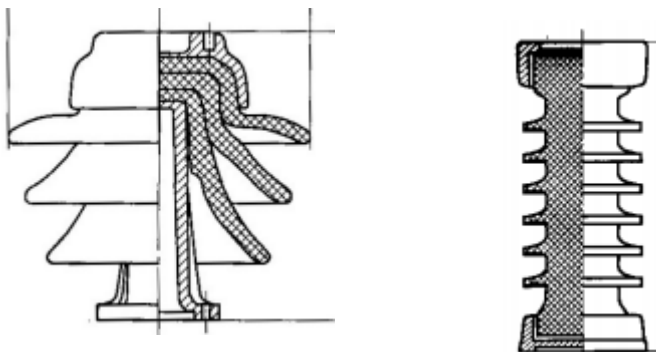


Рис.3.3 Деякі типи опорних ізоляторів: штирьовий (а) та стержневий (б)

Опорні ізолятори використовують для кріплення високовольтних шин, коли необхідно мати високу механічну міцність, а також як елементи ізоляції високовольтних роз'єднувачів та вимикачів. Деякі типи опорних ізоляторів наведені на рис.3.3. Опорні ізолятори закріплюються за допомогою штиря (штирьові), чи спеціального кріплення (стержневі) на траверсі чи опорі. Кріплення дротів виконують у верхній канавці ізолятора за допомогою дротової в'язки.

3.1.2 Стационарно-апаратні ізолятори

Конструкції стаціонарно-апаратних високовольтних ізоляторів подібні конструкціям лінійних ізоляторів. Основні з них наступні.

Опорні ізолятори призначені для кріплення шино проводів, деталей апаратів і ізолювання їх від заземлених конструкцій і між собою. Їх виготовляють для зовнішнього та внутрішнього встановлення на напруги до 110 кВ. Для підвищення напруги їх збирають у колони. Опорні ізолятори підрозділяються на штирьові та стержневі.

Опорно-штирьові ізолятори використовують при необхідності більшої механічної міцності конструкції. Приклад позначення: ОНШ-35-2000: опорний

штирьовий зовнішнього використання, номінальна робоча напруга 35 кВ, номінальне руйнівне навантаження 2000 кгс.

В опорно-стержневих ізоляторах їх кінці армовані чавунними фланцями. Приклад позначення: ОНС-110-1000: опорний для зовнішнього встановлення, стержневий, номінальна робоча напруга 110 кВ, номінальне руйнівне навантаження 1000 кгс.

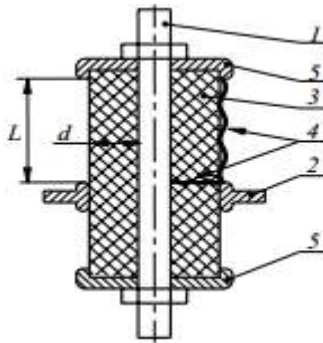


Рис.3.4 Типова конструкція прохідного ізолятора:

- 1 – струмопровідний стержень;
- 2 – заземлений фланець;
- 3 – тверда ізоляція; 4 – шляхи пробую;
- 5 – високовольтні фланці

Прохідні ізолятори та вводи використовують, коли струмопровідні частини проходять крізь стіни, перекриття, огороження, чи крізь металевий корпус обладнання. Прохідними ізоляторами називають ізолятори на напругу до 35 кВ, а вводами – ізолятори на напругу 110 кВ та вище. Останні мають більш складну конструкцію ізоляції і виконуються за допомогою масло-бар'єрної ізоляції (до 150 кВ) чи папірово - масляної ізоляції (220 кВ та вище)

Прохідні ізолятори з напругою до 35 кВ виготовляють з електротехнічного фарфору, скла, бакелітового паперу. Типова конструкція прохідного ізолятора наведена на рис.3.4.

Вводи – це прохідні ізолятори на 110 кВ і вище. Вони мають зовнішню та внутрішню ізоляцію складної конструкції. Зовнішня ізоляція це звичайно фарфорова кришка, а внутрішня ізоляція – це ділянки ізоляції у тілі вводу. Вводи бувають двох типів: масло- бар'єрні та папірово-маслені.

Масло-бар'єрний ввід на напругу 110-150 кВ є конденсаторного типу (рис.3.5). Щоб підвисити пробивну напругу ізоляцію розбивають на декілька малих проміжків між бар'єрами 5 і вирівнюють електричне поле металевими обкладинками (фольга на бар'єрах). Це підвищує пробивну напругу приблизно в 2,5 рази.

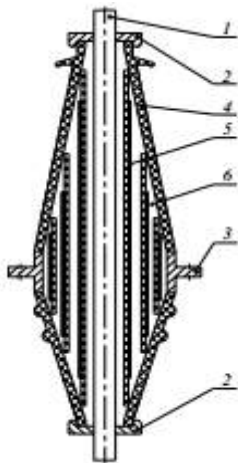


Рис.3.5 Типова конструкція масло-бар'єрного вводу:

- 1 – струмопровід;
- 2 – високовольтний фланець;
- 3 – заземлений фланець;
- 4 – фарфорова кришка;
- 5 – бар'єри з обкладинками;
- 6 – масло

Обкладинки вирівнюють поле в радіальному та аксіальному напрямках. Найбільш важливе вирівняти електричне поле у аксіальному напрямі для зменшення довжини вводу. Для цього уступи роблять однаковими. На рис.3.6 наведені епюр розподілу напруженості електричного поля в радіальному (а) та аксіальному (б) напрямках масло-бар'єрного вводу.

Струмопровідний стержень обмотують декількома шарами паперу. Основну електричну міцність ізоляції вводу забезпечує масло, яке розташовано у нутрі кришки.

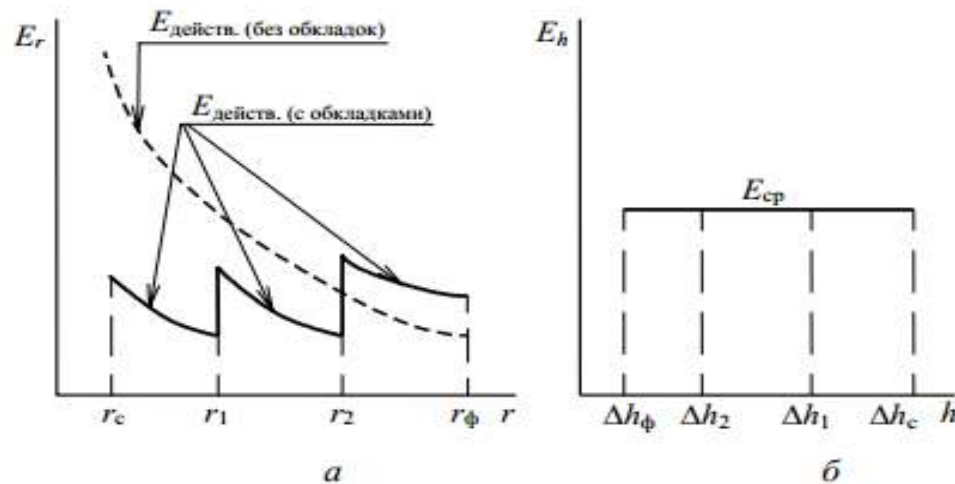


Рис.3.6 Розподіл напруженості електричного поля в радіальному (а) та аксіальному (б) напрямках масло-бар'єрного вводу:

r_c – радіус струмопровідну; r_1 – радіус першої обкладинки (фольги); r_2 – радіус другої обкладинки (фольги); r_ϕ – радіус обкладинки у фланця (заземлена);
 Δh_c – довжина уступу ізоляції у стержня; Δh_1 – довжина уступу на першому бар'єрі; Δh_2 – довжина уступу на другому бар'єрі; Δh_ϕ – довжина уступу на бар'єрі у фланця

Папірово-масляний ввід конденсаторного типу виконують шляхом намотування на струмопровідний стержень декількох шарів паперу. Кожні 2...4 мм в тіло ізоляції розміщують конденсаторні обкладинки з алюмінієвої фольги для вирівнювання поля в осевому та радіальному напрямках. Після намотування ізоляції тіло ізоляції пропитують маслом в вакуумі, та герметизують.

Вводи виготовляють на: 110, 150, 220, 330, 500, 750 кВ змінного струму – від 200 до 4000А. Вводи мають таке наступне призначення, конструкторське виконання і маркування. Апаратні вводи:

- для трансформаторів і реакторів – Т;
- для масляних вимикачів – У;
- для виведення струмоведучих частин крізь стіни і перекриття –Л;
- для спец. реакторів – Р.

За умовами експлуатації:

- для районів з невеликим забрудненням;
- для районів з сильним забрудненням з посиленою ізоляцією –У;
- для тропіків – Т.

За конструктивним виконанням:

- герметичні – Г;
- негерметичні;
- мають загальну масляну систему з апаратом – О;
- з проводом для підключення контрольних приладів – П.

Приклади маркування високовольтних ввідів.

Масляні вимикачі
МБВУ – 110/220 – У1 ГОСТ 10693 – 75
 0 – 15
 Мокливі кут нахилу Напряга, кВ Категорія розташування

Гермет. тр-ра Для вимр.
ГМБТП – 220/1000 – У1
 0 – 45
 Мокливі кут нахилу Напряга, кВ Категорія розміщення

3.2 Ізоляція високовольтних кабелів

Електричними кабелями називають ізольовані провідники, які мають захисні оболонки що захищають ізоляцію та струмопровідні провідники від механічних пошкоджень та зовнішнього впливу. Основне призначення кабелю – передавання електричної енергії від генераторів до споживачів.

Основні переваги кабелів наступні:

- більш безпечні умови експлуатації;
- можливість їх прокладання у будь яких спорудженнях, в тому числі і под. землею;
- кабельні лінії не відчують впливу зміну зовнішніх атмосферних дій;
- кабельні лінії допускають передавання великих потужностей до споживачів.

До ізоляційних, захисних та провідникових матеріалів кабелів пред'являються високі вимоги:

- Вони повинні мати високу механічну міцність, яка забезпечувала би багатократне перегинання кабелю при його прокладанні;
- Вони повинні мати значний строк служби, оскільки прокладання кабелю, та пошук його пошкоджень потребує значних часових та фінансових затрат;
- Ізоляційні матеріали кабелю повинні мати значну електричну міцність, що дозволяє зменшити товщину ізоляції, і як наслідок покращити умови тепловідводу від струмопровідних жил, збільшити допустимий струм, а також забезпечити більшу гнучкість та меншу вагу кабелю.

Для ізоляції високовольтних кабелів використовують різні еластичні матеріали: резину, папір, синтетичні плівки, полівінілхлоридний пластифікат, термопластичний поліетилен, а також паперо-масляну ізоляцію.

Як провідникові матеріали струмопровідних жил кабелів використовують мідь та алюміній. Провідність міді вища за алюміній в 1,65 разів, але вона має в 3,3 рази більшу питому вагу. До того ж мідь є дефіцитним матеріалом, що збільшує вартість кабелю.

Струмопровідні жили виконують як суцільними та і витими з тонких дротів. Для зменшення діаметру кабелю при великих перетинах струмопровідні жили мають секторну форму, а багатодротові жили опресуються. Жили маслозаповнених та газонаповнених кабелів роблять у вигляді трубчатих циліндрів.

Герметична оболонка, яка захищає ізоляцію від механічних пошкоджень та вологості виготовляється з алюмінію чи свинцю. Алюмінієва оболонка порівняно з свинцевою має більшу міцність, стійкість до вібрацій та може використовуватися як нульовий провідник. При великих діаметрах, коли кабель має значну жорсткість, то його оболонку виконують у вигляді гофри.

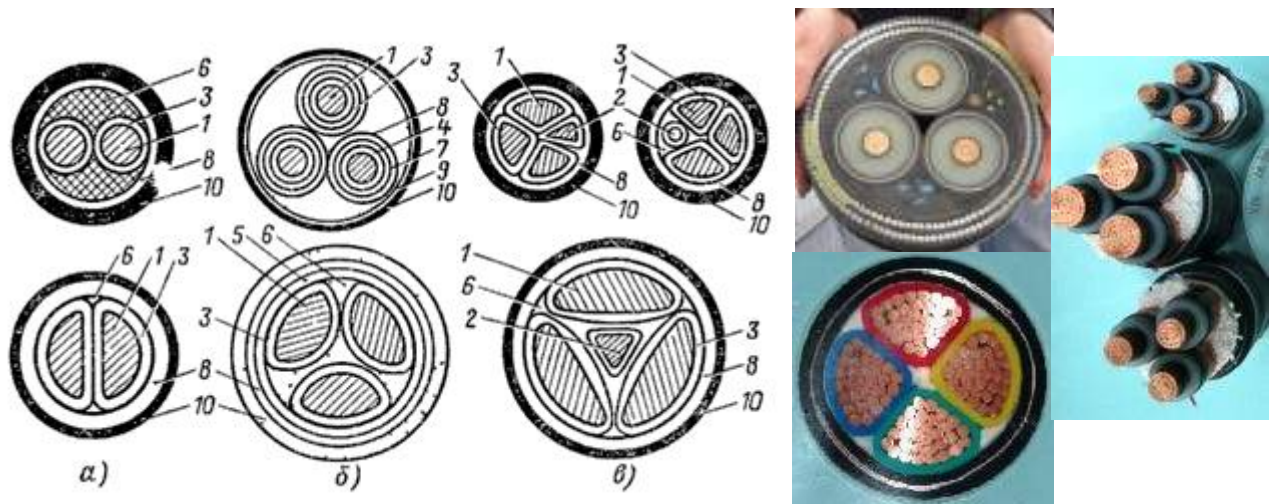


Рис.3.7 Перетини основних типів високовольтних силових кабелів:

а - двожильні кабелі з круглими і сегментними жилами, б - трижильні кабелі з поясною ізоляцією і окремими оболонками, в - чотирьохжильні кабелі з нульовою жилою круглої, секторної і трикутної форми,

- 1 - струмопровідна жила, 2 - нульова жила, 3 - ізоляція жили, 4 - екран на струмопровідній жилі, 5 - поясна ізоляція, 6 - заповнювач, 7 - екран на ізоляції жили, 8 - оболонка, 9 - броневий покрив, 10 - зовнішній захисний покрив

Перетин основних типів кабелів наведений на рис.3.7, а їх класифікація за напругою наведена на рис.3.8.

Основні типи високовольтних кабелів наступні:

1. Кабелі з паперовою ізоляцією та в'язким просоченням на напругу до 35 кВ.
2. Кабелі з паперовою ізоляцією та масляним просоченням під тиском (маслозаповнені кабелі)..
3. Кабелі з монолітною полімерною ізоляцією (поліетилен, фторопласт, полівінілхлорид, гума та ін.)



Рис.3.8 Класифікація кабелів за напругою

Кабелі з паперовою ізоляцією та в'язким просоченням (ППІ)

Перші ізольовані кабелі мали жилами, які були обмотані сухими паперовими стрічками. Їх просочували високо в'язким складом, що забезпечує високу електричну міцність діелектрика. Основну складність представляла проблема видалення води з ізоляційного шару. Винахід свинцевого пресу в 1878 році вирішив проблему. З цієї миті стало можливо захистити одножильні і

багатожильні кабелі від шкідливої дії води за допомогою товстої свинцевої оболонки, яка також у разі її заземлення захищала персонал від електричного удару. Конструкції сучасних кабелів успадкували основні риси перших кабелів. Найзначніше удосконалення - заміна просочувального масла чистішим нестікаючим складом. Кабелі цього типу залишалися в експлуатації, демонструючи надзвичайну ефективність і надійність аж до 80-х років, але в наступний час практично не використовуються.

Маслозаповнені кабелі (МЗ)

При збільшенні напруги в лініях передачі виявилось, що кабелі з в'язким просоченням не працездатні при роботі від 60 кВ і вище. Збільшення товщини ізоляції дозволило успішно працювати при напрузі до 100 кВ. Проте при великій напрузі надійність і опір старінню виявилися незадовільними. На початку 20-х років 20 століття, був розроблений маслонаповнений кабель. У маслонаповнених кабелях паперова ізоляція просочується маслом, яке постійно тримається під тиском. В процесі виготовлення з кожного кабелю відкачується повітря, і порожнина заповнюється маслом. Особливо важливо забезпечити відсутність повітряних бульбашок. Під час експлуатації кабель нагрівається і масло розширюється. Зміни об'єму масла регулюються компенсаційними резервуарами, сполученими з кінцями кабелю. Тиск в резервуарах підтримується стислим повітрям, що знаходиться в стискуваних секціях. Масляні протоки усередині кабелю дозволяють йому вільно перетікати при розширенні або стискуванні. Об'єм гідравлічної системи вибирається відповідно до довжини кабелю так, щоб навіть у разі короткого замикання ризик механічного ушкодження був мінімальний за рахунок вирівнювання гідравлічного тиску, викликаного викидами тиску внаслідок різкого нагріву. Маслонаповнені кабелі надзвичайно стійкі до старіння. Виміри коефіцієнта діелектричних втрат кабелю, призначеного для напруги 150 кВ і що знаходиться в експлуатації 30 років, дали практично такий же результат, як і тоді, коли уперше ввели в експлуатацію.

Перевагою маслонаповнених кабелів є те, що в них можливий постійний моніторинг тиску масла, сьогодні вони залишаються найбільш надійними в експлуатаційному відношенні серед усіх високовольтних і понадвисоковольтних кабелів. Маслонаповнені кабелі мають товсту безшовну герметичну оболонку зі свинцю, або мідну або алюмінієву гофровану оболонку, яка містить в собі гідравлічний контур.

До недоліків слід віднести використання масла та чутливість до нахилу.

Маслонаповнені кабелі виготовляють на напруги вище 110 кВ. Вони бувають двох модифікацій: з порожнистими струмопровідними жилами та в трубах, які заповнені маслом. Ізоляція в таких кабелях просмоктується малов'язким, стійким до розпаду в електричному полі газопоглинаючим маслом. В процесі експлуатації просочена ізоляція знаходиться під збитковим тиском масла, яке циркулює в порожистій жилі кабелю. Масло проникає в ізоляцію крізь зазори в жилі, що виключає появу газових включень, що в свою чергу підвищує пробивні напруги. Маслонаповнені кабелі бувають низького (до 0,2 МПа), середнього (0,4...0,6) МПа чи високого (1...1,6) МПа тиску. 3

підвищенню тиску покращується просочення масла в ізоляцію, але необхідна більш міцна захисна оболонка.

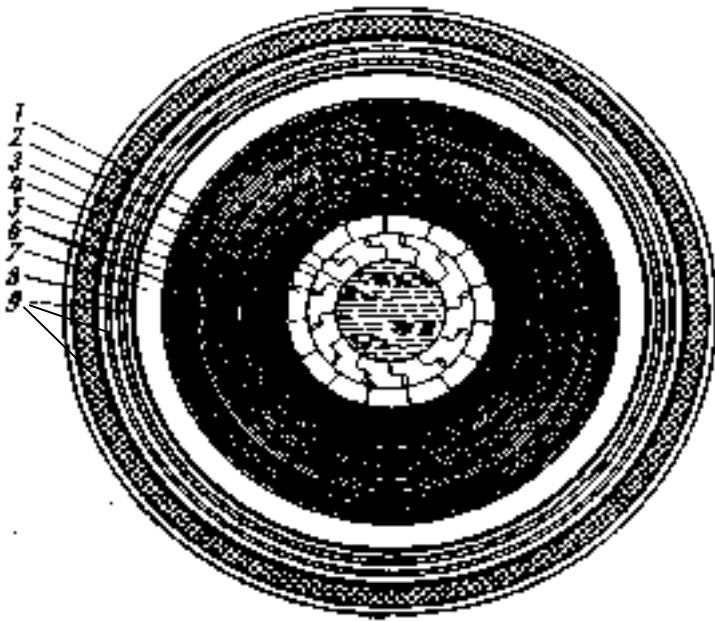


Рис.3.9 Схема маслонаповненого кабелю низького тиску з напругою 110...220 кВ : 1 - канал для циркуляції масла; 2 - Z - подібні дроти струмопровідної жили; 3 - сегментні дроти жили; 4 - ізоляція з паперу товщиною 0,08 мм; 5 - ізоляція з паперу товщиною 0,12 мм; 6 - екран з електропровідного паперу (просоченого сажею); 7 - свинцева оболонка; 8 - зміцнюючі покриви; 9 - захисні покриви

На рис.3.9 наведений приклад побудови ізоляції маслонаповненого кабелю. Канал для циркуляції масла 1 утворюється за допомогою лужених дротів Z-образної форми 2, поверх яких наноситься намотування з дротів сегментної форми 3, о утворює струмопровідну жилу. Така конструкція струмопроводу має значну міцність та гладеньку поверхню, що суттєво для великих напруг, оскільки нерівності викликають локальне підвищення напруженості електричного поля. Лудіння дротів сприяє старінню масла. Ізоляція сегментів – папір з напівпровідним шаром 6 (з сажею). Загальна ізоляція складається з декількох шарів тонкого та щільного паперу 4 та більш товстого та пористого паперу 5, що вирівнює радіальну неоднорідність електричного поля. Поверх струмопровідної жили 2 і ізоляції 4 та 5 наноситься напівпровідні екрани з паперу просоченого сажею 6. Захисна оболонка кабелю 7 виконується з свинцю чи алюмінію. Поверх цієї оболонки накладають міцний шар 8 з синтетичних стрічок, а зверху ще й броне вій покрив. з немагнітних матеріалів (метал).

Кабелі з монолітною полімерною (пластмасовою) ізоляцією



Рис.3.10 Вигляд водних трингів у XLPE ізоляції

На відміну від маслонаповнених кабелів ізоляція провідників таких кабелів є твердим екструдованим шаром поліетилену. Це забезпечує простоту монтажу арматури і виключає забруднення довкілля, оскільки немає просочуючої рідини. Ці кабелі з'явилися у 80 роках 20 століття. Хороші експлуатаційні показники полімерних кабелів середнього рівня напруги (до 60 кВ) послужила передумовою успіху у високовольтному діапазоні. Рішучим кроком вперед була розробка зшивних полімерних ізоляційних матеріалів, таких як XLPE (cross - linked polyethylene - зшитий поліетилен (СПЕ) з поперечним молекулярним зв'язком) і EPR

(ethylene - propylene rubber - етиленпропіленова гума), а також впровадження технології одночасної екструзії внутрішнього електропровідного екрану, ізоляційного шару і зовнішнього електропровідного екрану. Такі кабелі продемонстрували високі експлуатаційні характеристики. Єдиною їх слабкою стороною можна вважати тенденцію до розвитку трієнгів (water - treeing) – просочення вологи по мікропорах (рис.3.10). Цей недолік можна запобігти шляхом використання відповідних засобів, спрямованих безпосередньо на запобігання проникненню води в ізоляцію. В наступний час це найпоширенні кабелі у судновому високовольтному обладнанні. Порівняльний аналіз властивостей ізоляції високовольтних кабелів наведений в табл.3.1.

Таблиця 3.1 - Порівняльний аналіз властивостей ізоляції високовольтних кабелів

Характеристики	Кабель ППІ	Кабель XLPE	Кабель EPR
Номинальна температура жили, °C	70	90	до 105
Температура жили при перевантаженні, °C	90	105-110	до 140
Мінімальна температура прокладання без підігріву, °C	0	- 15	до - 40
Тангенс куту діелектричних втрат	0,008	0,001	0,004
Електрична міцність, кВ/мм	50	80	60
Електричний опір, МОм·км	200	200	200
Мінімальний радіус згинання, який кратний діаметру кабелю	25	15	7
Нерозповсюдження горіння	добре	задовільно	добре
Термін експлуатації, роки	30	40	40

XLPE – та і EPR –ізоляції високовольтних кабелів мають наступні переваги:

- діапазон робочих температур більший, ніж у дротів з іншим типом ізоляції;
- відмінна пропускна спроможність;
- високий допустимий струм навантаження (в порівнянні з аналогами з паперовою ізоляцією - на 30% вище);
- стійкість до дії кислот, лугів і вологи;
- екологічна безпека;
- відсутність масла, що унеможливорює його витікання при прокладенні кабелю на різних перепадах висот ("видавлене" масло, або в'язкий ізоляційний просочувальний склад, висушить оброблення, що у результаті може привести до короткого замикання)
- мала вага, середній діаметр і великий радіус вигину дозволяють експлуатувати кабель на складних трасах. Роботи по монтажу і прокладенню цих кабелів можуть виконуватися без додаткового підігрівання з радіусом вигину до 15 зовнішніх діаметрів і при одноразовому вигині - до 7,5 при температурі від - 15 до - 20°C. ;
- високий струм термічної стійкості при короткому замиканні (до 250 °C);
- незначний показник втрат в ізоляції (0,001)
- значний термін служби (не менш 40 років).

З недоліків необхідно виділити два:

- висока вартість;
- під дією ультрафіолетових променів активізується процес старіння;
- відсутня стійкість до дії високих температур.

На рис.3.11 наведена поясна конструкція трьохжильного кабелю на напругу до 10 кВ. Він складається з трьох струмопровідних жил 1, які можуть бути суцільними, чи багатодрововими з перетином 25...250 мм, з фазної 2 та поясної 3 ізоляції, (остання є загальною для усіх жил), захисну оболонку 4, підкладку під броню 5, захисну броню 6, яка складається з двох сталевих полос

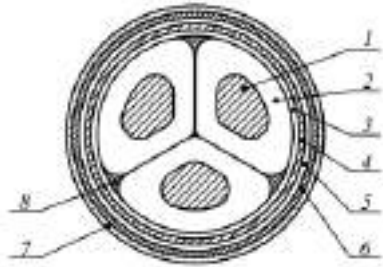


Рис.3.11 Схема побудови ізоляції кабелю з напругою до 10 кВ.

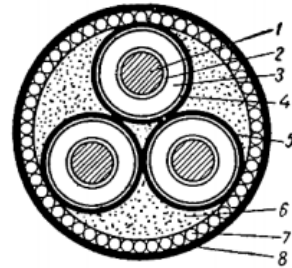


Рис.3.12 Схема побудови ізоляції кабелю з напругою до 35 кВ.

та антикорозійне покриття 7 з скляної пряжі. Пустоти у кабелі заповнюються звичайно джутом 8. Фазова та поясна ізоляція виконані з паперової стрічки. Для більшої гнучкості кабелю цю ізоляцію виконують двома шарами з перекритими зазорами

Кабелі з робочою напругою 20...35 кВ виготовляють з напівпровідними шарами 2 і 4 по жилі 1 і ізоляції 3, а також окремих захисних оболонок 5 для кожної фази (рис.3.11). Жили трьохфазного кабелю скручуються, проміжки заповнюються просоченою джутовою пряжею, потім тканевою стрічкою, та бронюються круглим дротом 7, поверх якого наноситься антикорозійне покриття 8. Наявність напівпровідних шарів зменшує радіальну неоднорідність електричного поля, що сприяє підвищенню пробивної напруги. Відсутність поясної ізоляції покращує тепловідвід, що в свою чергу збільшує струмопровідне навантаження на (10...20) %.

Конструкція трижильного кабелю напругою 10-500 кВ (рис.3.13) має багатшарову структуру, що складається з 8-11 шарів залежно від призначення і способу прокладення.

Струмопровідна жила 1 виготовляється з багатодровового повіу з алюмінію або з міді круглого перетину. Поверх струмопровідної жили методом екструзії накладається екран 2, який уявляє собою шар з електропровідного варіанту поліетиленової композиції XLPE, в який додані деякі домішки (в основному електропровідна сажа). Домішки сажі дозволяють отримати напівпровідну композицію, внаслідок чого виникає напівпровідний екран, який вирівнює електромагнітне поле (до 30 %). Це дозволяє знизити вірогідність виникнення часткових розрядів. Далі на жилу наноситься основна ізоляція 3 з зшитого поліетилену. Товщина цієї ізоляції залежить від необхідної напруги. Поверх основної ізоляції знову методом екструзії наноситься електропровідний



Рис.3.13 Конструкція трижильного високовольтного кабелю з XLPE – ізоляцією:
 1 - струмопровідна багатодротова жила з алюмінію; 2 – електропровідний екран на струмопровідній жилі; 3 - основна ізоляція жили з XLPE, 4 – електропровідний екран на основній ізоляції, 5 – підкладка - електропровідний папір, 6 – екран з повію мідних дротів та мідної фольги, 7 – жгут з ПВХ, 8 – поясна ізоляція з ПВХ, 9 – зовнішній захисний покрив

екран 4, такий як і екран 2, але кількість сажі в ньому досягає 40 %.. Цей екран теж вирівнює електричне поле.

Далі накладають захисні матеріали. Спочатку накладають комбінований екран, який складається з шару електропровідного паперу або з полімерної стрічки 5 завтовшки приблизно 0,2 мм (це виключає оплавлення ізоляції при протіканні струму короткого замикання по екрану і забезпечує герметизацію ізоляції) та повію з мідних дротів 6 (діаметром 0,7-2,0 мм), поверх яких протилежно повію мідних дротів спіралью накладена мідна фольга товщиною 0,1 мм і шириною 20 мм. Ця фольга забезпечує контакт між мідними дротами для більш рівномірного розподіленню щільності струму, який протікає по екрану.

Отримані три екрановані жили скручують вздовж жгута 7 з ПВХ пластикату 7, який має знижену пожежебезпечність та блокує проникнення вологи. Далі проміжки заповнюють ПВХ пластикатом 8, який має знижену пожежебезпечність та поверх накладають зовнішню оболонку з ПВХ пластикату 9, але з властивостями світло стабілізації і доброї механічної міцності.

Кабелі з резиновою ізоляцією (EPR типу) випускають як зі суцільними так і з багатодротовими жилами. Основною перевагою таких кабелів є їх значна гнучкість. Але резинові кабелі значно уступають по електричним параметрам другим типам кабелів, крім того під впливом озону, кисню, температури, освітлення резина втрачає свої еластичні властивості та механічну міцність.

Ізоляція такого кабелю має подібну конструкцію, але, захисна оболонка 9, може бути гумова, свинцева, або полівінілхлоридна (рис.3.14).

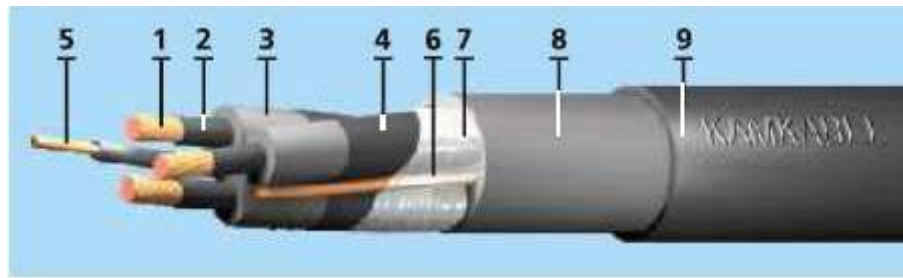


Рис.3.14 Конструкція трижильного високовольтного кабелю з гумовою ізоляцією:

- 1 - струмопровідна багатодротова жила з міді; 2 - електропровідний екран на струмопровідній жилі з струмопровідної гуми; 3 - основна ізоляція жили з гуми, 4 - електропровідний екран на основній ізоляції, 5 - додаткова жила (може бути відсутня), 6 - жила заземлення, 7 - роздільний шар з плівки ПЕТ, 8 - внутрішня оболонка з гуми, 9 - зовнішня оболонка з гуми

Треба відзначити особливості тестування високовольтної ізоляції кабелів в залежності від типу ізоляції.

Кабелі з паперово-просоченою та гумовою ізоляцією необхідно випробовувати постійною (випрямленою) напругою. Але кабелі із зшитого поліетилену (з XLPE – ізоляцією) випробовувати постійною напругою не допустимо. При проведених дослідженнях було виявлено, що при випробуванні кабелю XLPE постійною (випрямленою) напругою в шарі ізоляції із зшитого поліетилену і на поверхні екранів, що проводять, виникає накопичення локальних об'ємних зарядів, які кінець кінцем можуть привести, або до значного зниження терміну служби кабелю, або до пробоя його ізоляції. Цьому явищу найбільше піддані кабельні муфти, оскільки вони є найбільш слабкими елементами кабельної лінії.

Кабелі із зшитого поліетилену (з XLPE – ізоляцією) рекомендують випробувати наступною випробувальною змінною напругою:

- $3U_0$ частотою 0,1 (Гц) впродовж 1 години

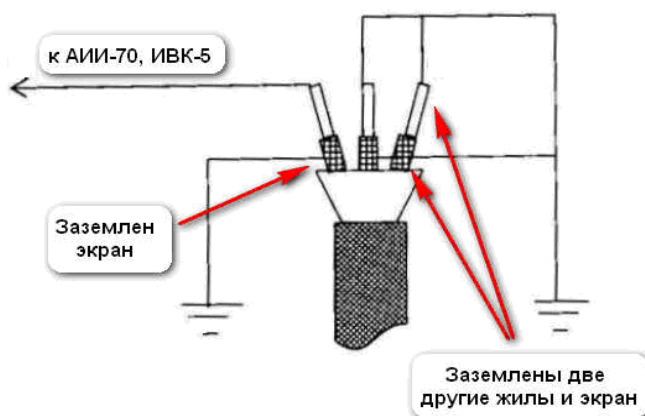


Рис.3.15 Схема випробування високовольтної ізоляції кабелю з зшитого поліетилену (XLPE)

- U_0 промисловою частотою 50 (Гц) впродовж 24 годин (1 доба)
 - $2U_0$ промисловою частотою 50 (Гц) впродовж 1 години
- де U_0 - це фазна напруга, тобто напруга між фазою і "землею" (заземленою нейтралю).

При проведенні випробувань інші жили і екрани кабелю мають бути обов'язково заземлені (рис.3.15).

Якщо система електропостачання виконана з глухо заземленою нейтраллю, а це означає, що фазна напруга U_0 складає в корінь з 3 разів менше, ніж лінійна напруга мережі, тобто при лінійній напрузі 10,5 (кВ) фазна напруга складає близько 6 (кВ). Виходить, що кабель із зшитого поліетилену напругою 10 (кВ) необхідно випробовувати таким чином:

- 18 (кВ) частотою 0,1 (Гц) впродовж 1 години
- 6 (кВ) промисловою частотою 50 (Гц) впродовж 24 годин (1 доба)
- 12 (кВ) промисловою частотою 50 (Гц) впродовж 1 години

В табл.3.2 наведені основні вимоги до випробування кабелів із зшитого поліетилену (з XLPE – ізоляцією).

Таблиця 3.2 - Основні вимоги до випробування кабелів із зшитого поліетилену (з XLPE – ізоляцією) на змінному струмі з ізольованою нейтраллю

Напруга кабельної лінії, кВ	Напруга випробування, кВ	Частота напруги випробування, Гц	Тривалість прикладення напруги випробування, годин
6	10,5	0,1	1
	3,5	50	24
	7	50	1
10	18	0,1	1
	6	50	24
	12	50	1
20	36	0,1	1
	12	50	24
	24	50	1
35	60	0,1	1
	20	50	24
	40	50	1

Як альтернатива випробуванню змінною напругою, пропонується випробування кабелю проводити постійною (випрямленою) напругою $4U_0$ впродовж 15 хвилин. Таким чином, кабель з ізоляцією із зшитого поліетилену напругою 10 (кВ) допускається випробовувати постійною (випрямленим) напругою 24 (кВ) впродовж 15 хвилин. Дані для випробувань кабелів з іншими класами напруги наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Основні вимоги до випробування кабелів із зшитого поліетилену (з XLPE – ізоляцією) на постійному струмі

Напруга кабельної лінії, кВ	Постійна (випрямлена) напруга випробування, кВ	Тривалість прикладання напруги випробування, хвил
6	14	15
10	24	15
20	48	15
35	80	15

3.3 Ізоляція високовольтних конденсаторів

Високовольтні конденсатори використовують в енергетичному обладнанні для компенсації реактивної потужності, для компенсації індуктивного опору ліній електропередач та їх високочастотній обробці.

Призначення силових високовольтних конденсаторів наступне:

1. покращення $\cos \varphi$;
2. компенсація здвигу фаз між струмом та напругою;
3. випрямляючі пристрої;
4. високовольтні імпульсні пристрої;
5. ВЧ зв'язок.

Конденсатор характеризується питомою запасеною енергією:

$$W = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \cdot E_{\text{ПР}}}{2}, \text{ Дж/м}^3 \quad (3.1)$$

Чим вища діелектрична проникність ε , та чим вище електрична міцність діелектрика $E_{\text{ПР}}$, тим при тій же реактивної потужності він має менші розміри.

Усі високовольтні конденсатори мають однакову конструкцію – спіральну і складаються з пакетів (секцій), які з'єднують паралельно, послідовно чи комбіновано (рис.3.16). Такі секції розташовані в одному герметичному корпусі

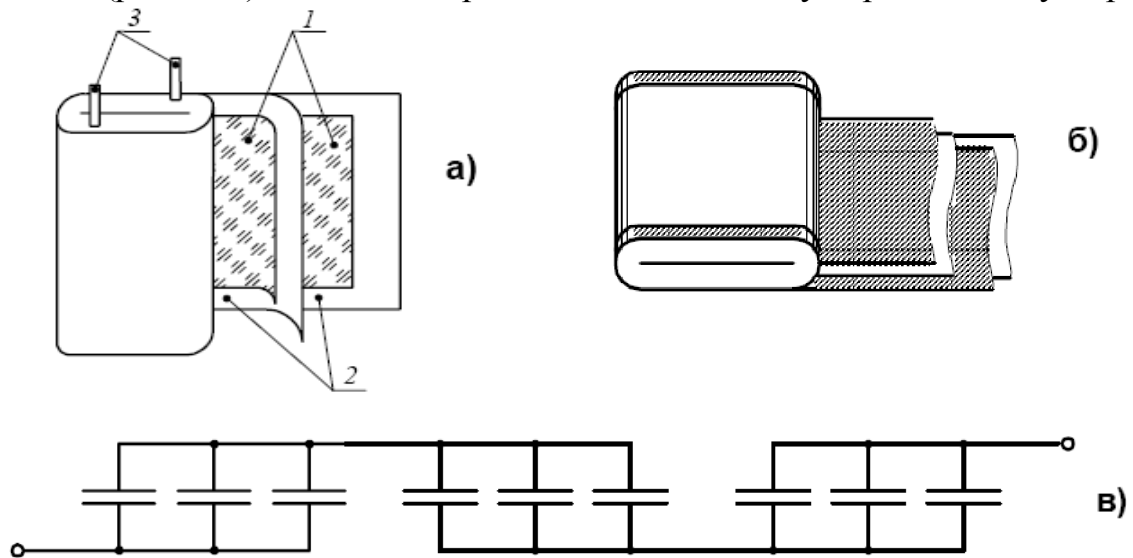


Рис.3.16 Структура секції високовольтного конденсатора зі скритою (а) та : виступаючою (б) фольгою, а також схема змішаного з'єднання секцій (в):

1 – фольга; 2 – твердий діелектрик; 3 - виводи

та залиті діелектричною рідиною. Секції після намотки сплющують для зменшення їх об'єму (рис.3.16). Для виготовлення високовольтних конденсаторів використовують паперово–масляну ізоляцію, яка складається з конденсаторного паперу, який просочений конденсаторним маслом та полімерної плівки. Остання вкладається між шарами паперу чи у вигляді плівки наноситься на алюмінієву фольгу. Намотка секцій конденсаторів виконується зі скритою (рис.3.16 а) або виступаючою фольгою (рис.3.16 б). При виступаючій

фольги покращується теплопередача і зменшується індуктивність. При скритій намотці пробивна напруга конденсатора вище.

Короточасна електрична міцність такого конденсатора визначається в основному електричною міцністю твердої ізоляції. Довготривала електрична міцність визначається в основному розвитком часткових розрядів, які виникають в рідкому діелектрику в наслідок газовик включень, які в свою чергу виникають при тепловому розпаді рідкого діелектрика, а також тепловим старінням рідкого діелектрика.

3.4 Ізоляція високовольтних трансформаторів

В силових трансформаторах ізоляція складається з різних за конструкцією елементів, які працюють у різних умовах. Ізоляція трансформаторів підрозділяється на зовнішню і внутрішню.

Зовнішня ізоляція складається з повітряних проміжків між вводами і заземленим баком, між виводами різної напруги, а також уподовж фарфорових покришок вводів.

До *внутрішньої ізоляції* відносять ізоляцію обмоток, внутрішню ізоляцію вводів, а також вводів до перемикального пристрою. Внутрішня ізоляція підрозділяється на *головну* і *подовжню*. До *головної ізоляції* відносять ізоляцію між обмотками і магнітопроводом, між обмотками і баком, а також ізоляцію обмоток різної напруги і фаз між собою (міжфазова ізоляція). До *повздовжньої ізоляції* відносять виткову ізоляцію між котушками і шарами обмотки однієї фази.

Трансформатори до 35 кВ виконують з ізолюваною нейтраллю, а вище 110 кВ – з заземленою нейтраллю. При заземленій нейтралі найбільша імпульсна напруга на головній ізоляції буде на відстані $1/3$ довжини обмотки від початку і може на 20% перевищувати діючу напругу. При ізолюваній нейтралі найбільша імпульсна напруга буде на кінці обмотки і може перевищувати діючу напругу на 50- 80%.

Обмотки трансформатора виконують або на циліндричному каркасі типу «котушка», або безперервною циліндричною багатошаровою намоткою.

Для зниження напруги на поздовжній ізоляції застосовують ємнісні екрани і так звані переплетені обмотки, коли витки з'єднуються у певній послідовності. При цьому сусідні витки знаходяться під суттєво різними потенціалами і зниження імпульсних перенапруг досягається за рахунок збільшення робочої напруги на поздовжній ізоляції.

Головна ізоляція трансформаторів виконується у вигляді масло-бар'єрної ізоляції і складається з шарів твердої ізоляції (бар'єрів), з електротехнічного картону, які встановлюються послідовно, і масляних каналів. Бар'єри виготовляються у вигляді циліндрів, шайб та згладжених кутів.. Вони перешкоджають переміщенню домішок в область сильних полів і збільшують міцність ізоляції на 20-30 %. Найбільший ефект збільшення міцності має місце, якщо бар'єр розташовується перпендикулярно силовим лініям поля, тому в трансформаторах, де поле має складну конфігурацію, застосовують комбінацію бар'єрів різної форми (циліндрична, плоска та згладжена кутова), щоб виконати

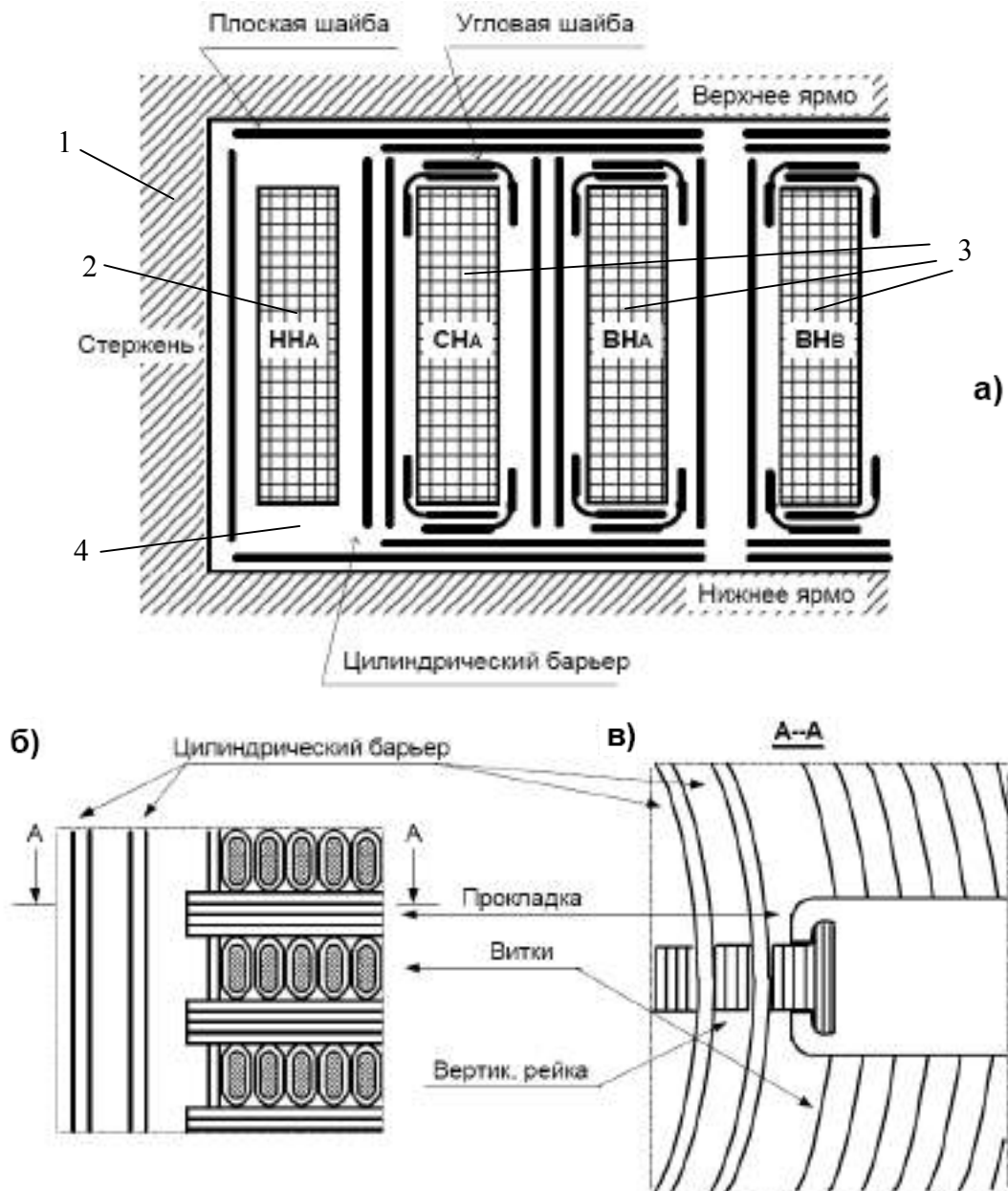


Рис.3.17 Структура секції високовольтного конденсатора зі скритою (а) та вертикальний (б) і горизонтальний (в) перетин масляних каналів:

1 – магнітопровід; 2 – низьковольтна обмотка; 3 – високовольтна обмотка;
4 – трансформаторне масло

цю умову (рис.3.17а). Завдяки ньому відсутня тангенціальна складова напруженості поля. Товщина бар'єрів 3-6 мм. Кількість бар'єрів визначається класом напруги і приймається рівною 1 при пробійній напрузі до 35 кВ і 2...6 при пробійній напрузі більш 110 кВ.

Для забезпечення циркуляції масла і відведення тепла споруджують масляні канали двох основних видів (рис.3.17 б):

- вертикальні канали між циліндричними бар'єрами і між бар'єрами і обмоткою за допомогою вертикальних рейок;
- горизонтальні канали між витками за допомогою горизонтальних прокладень, які служать одночасно для кріплення вертикальних рейок.

Повздожня ізоляція включає виткову ізоляцію обмотувальних дротів і ізоляцію між котушками. Виткова ізоляція дротів виконується з шарів кабельного паперу, накладається на дріт внахліст. Ізоляція між котушками складається з масляного каналу шириною 8-30 мм і паперовій ізоляції дротів. При необхідності застосовують додаткове підмотування папером усієї котушки. Вимоги до електричної міцності подовжньої ізоляції визначається специфікою перехідних процесів при дії імпульсних перенапружень.

Для ізоляції виводів трансформатора характерний нерівномірний розподіл електричного поля в радіальному і аксіальному напрямках, що може викликати виникнення місцевих розрядів у вигляді корони, а потім ковзаючих розрядів, що призводять до радіального пробою і до повздожніх перекриттів. Для створення рівномірного розподілу радіальної і аксіальної напруги використовують ізолятори конденсаторного типу, в яких примусовий розподіл напруги досягається за рахунок металевих обкладань, що закладаються в ізоляцію в процесі їх намотування. На струмопровідний стрижень намотується кабельний папір у вигляді рулонів або стрічок. Між шарами паперу закладаються металеві прокладення з алюмінієвої фольги. Папір висушується під вакуумом і просочується трансформаторним маслом. Остов з струмопровідного стрижня і намотаної ізоляції поміщається у фарфорову покришку і заливається трансформаторним маслом. Іноді в якості струмопровідного стрижня використовують високовольтний кабель.

3.5 Високовольтна ізоляція електричних машин

До цієї категорії відносяться електричні машини великої потужності: генератори, синхронні компенсатори і електричні двигуни великої потужності, що працюють при напрузі 3...20 кВ. Ізоляція електричних машин цього типу працює у важких умовах експлуатації: перенапруження, висока робоча температура, циклічність нагріву і охолодження, механічні зусилля і вібрація, дія продуктів розкладання, часткові розряди, неоднорідні поля. Необхідно також враховувати технологічні труднощі виготовлення ізоляції і можливість пошкодження ізоляції при виготовленні і укладанні. Вартість ізоляції потужних електричних машин складає 50-80 % від сукупної вартості усіх матеріалів електричних машин.

Високовольтна ізоляція електричних машин підрозділяється на наступні види:

- корпусна або головна ізоляція - між обмоткою і сталлю статора;
- міжфазна ізоляція - між обмотками різних фаз;
- виткова або подовжня ізоляція - між витками однієї секції або між котушками;
- ізоляція елементарних провідників - між провідниками в одному витку або стержні обмотки.

Витковая ізоляція виконується зазвичай із склослюдяний стрічки або на основі емальованих дротів із скловолокнистою обмоткою, просочених епоксидним компаундом. Головна ізоляція виконується на основі слюдяних

ізоляційних матеріалів із забезпеченням відсутності газових прошарків. Струмopровідна частина стержнів виконується прямокутної форми, і електричне поле в пазах неоднорідне. Для зниження неоднорідності поля кути стержнів закругляють або застосовують екрани (прокладення) з алюмінію.

Короткочасна електрична міцність корпусної ізоляції при товщині від 3 до 12 мм характеризується на частоті 50 Гц середньою електричною міцністю 30.35 кВ/мм. Проте робітники напруженості електричного поля у зв'язку з нестабільністю характеристик вибираються на рівні 2.4 кВ/мм. При робочих напруженнях у високовольтних електричних машинах впродовж тривалого часу існують часткові розряди помітної інтенсивності, які слабо впливають на надійність і довговічність ізоляції, оскільки слюда дуже стабільна до дії часткових розрядів.

Конструкція ізоляції залежить від потужності машини, способу охолодження і вживаних матеріалів.

Типова конструкція ізоляції турбогенератора наведена на рис. 3.18. Струмopровідні стержні 3 виконуються прямокутної форми (можуть бути суцільними 3 або порожнистими 4 – для безпосереднього охолодження). Внаслідок цього електричне поле в пазах статора неоднорідне. Ступень неоднорідності залежить від радіусу закруглення і товщини ізоляції. Для зменшення неоднорідності поля застосовують прокладення з алюмінію профілю (корита 11) і ізоляційні прокладення 10 із закругленими краями, а також закруглення стержнів. Поверх корпусної ізоляції 6 накладається шар із напівпровідної стрічки 7 для послаблення електричного поля в повітряних включеннях між ізоляцією і стінками паза, що зменшує інтенсивність часткових розрядів, ковзаючих розрядів і корони. Для зменшення часткових та ковзаючих

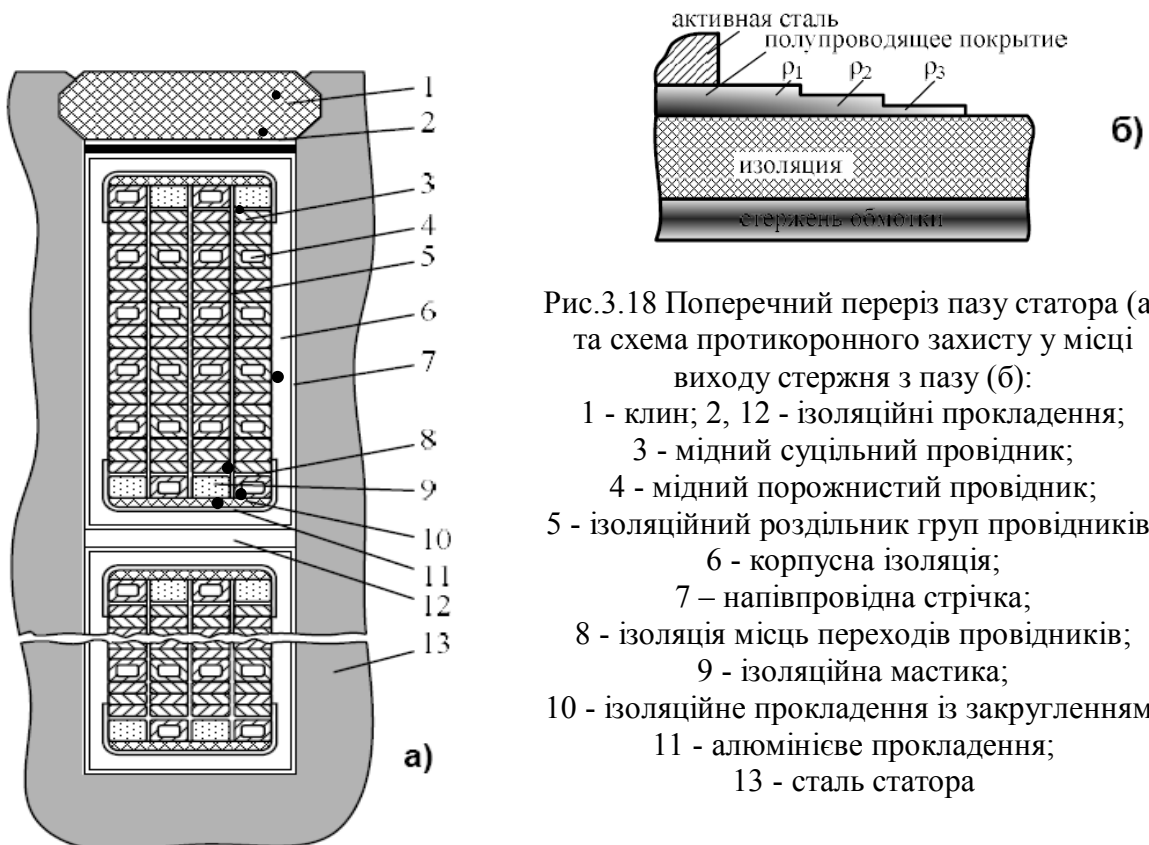


Рис.3.18 Поперечний переріз пазу статора (а) та схема протикоронного захисту у місці виходу стержня з пазу (б):

- 1 - клин; 2, 12 - ізоляційні прокладення;
- 3 - мідний суцільний провідник;
- 4 - мідний порожнистий провідник;
- 5 - ізоляційний роздільник груп провідників;
- 6 - корпусна ізоляція;
- 7 – напівпровідна стрічка;
- 8 - ізоляція місць переходів провідників;
- 9 - ізоляційна мастика;
- 10 - ізоляційне прокладення із закругленням;
- 11 - алюмінієве прокладення;
- 13 - сталь статора

розрядів використовують також стійку ізоляцію з підвищеним вмістом слюди. У лобових частинах обмотки для усунення розрядних процесів по поверхні при виході обмотки із статора наносять напівпровідні покриття, яке виводиться за межі паза і робиться декількома східцями з різним питомим поверхневим опором ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$) (рис. 3.18 б). Щільність поверхневого струму утікання при цьому зменшується у міру видалення від паза і розподіл напруги в лобових частинах вирівнюється. У найбільш важкому режимі працює ізоляція утікання. Для неї більш небезпечними є імпульсні перенапруження, менш небезпечні часткові розряди.

3.6 Старіння високовольтної ізоляції

При експлуатації на ізоляцію діють електричні, теплові, механічні та інші фактори. Вони викликають складні процеси погіршення діелектричних властивостей, що називають *старінням*. Процес старіння ізоляції обмежує термін служби, тому необхідно вживати заходи, що передбачають зниження темпів старіння і забезпечують необхідний термін її служби (20÷30 років).

Розрізняють електричне, теплове і механічне старіння ізоляції. Процес старіння відбувається також через абсорбцію вологи та забруднення з навколишнього середовища. У процесі експлуатації усі види старіння відбуваються одночасно і складним чином впливають одне на одного.

3.6.1 Електричне старіння

При робочій напрузі, а також при напрузі в 5÷20 разів меншій за пробивну, в ізоляції відбуваються процеси електричного старіння, які пов'язані з зміною у часі електричних параметрів діелектриків, особливо твердих, та виникненням часткових розрядів, які значно прискорюють темпи старіння. Із збільшенням діючої напруги темпи старіння зростають, а термін служби зменшуються.

Для великих термінів служби (більше 10^4 годин) справедлива експериментальна залежність:

$$\tau_{cp} = \frac{A}{(U - U_{cp})^n} \quad (3.2)$$

де τ_{cp} - середній термін служби ізоляції;

A – постійна ізоляції;

n – величина, яка залежить від типу ізоляції і роду діючої напруги (наприклад, для паперово-масляної ізоляції $n = 4-8$, а для масляно-паперової ізоляції: $n = 50-80$).

U - середня діюча напруга на ізоляторі;

U_{cp} – напруга появи в ізоляції часткових розрядів, що є причиною її інтенсивного старіння.

Інтенсивність електричного старіння залежить також від ряду факторів, що не підлягають контролю. Це кількість, розмір і розташування мікронерівностей

на поверхні електродів. Тому термін служби ізоляції при заданій напрузі є випадковою величиною.

Підвищення експлуатаційної надійності ізоляторів досягається окрім обмивання чи очищення їх водою або розчинниками також застосуванням гідрофобних покриттів; герметизацією ізоляційних конструкцій, а також профілактикою виникнення мікротріщин у діелектрику.

3.6.2 Старіння від механічних навантажень

При дії статичних і динамічних навантажень у твердих діелектриках відбувається впорядкований рух локальних дефектів, що поступово утворюють мікротріщини. При досягненні їх певної кількості і розмірів відбувається руйнування діелектрика. При дії статичного навантаження термін служби ізоляції τ визначають за формулою:

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp\left(\frac{W - \gamma \cdot \sigma}{kT}\right) \quad (3.3)$$

де τ_0 , W , γ – параметри, що характеризують міцнісні властивості матеріалу ізоляції ;

σ – механічне напруження в матеріалі від дії навантаження;

k – постійна Больцмана;

T – абсолютна температура.

При одночасному впливі механічних навантажень і сильних електричних полів старіння прискорюється через виникнення часткових розрядів у мікротріщинах, які підвищують темпи старіння ізоляції.

3.6.3. Вплив зволоження на процеси старіння

Волога просочується в ізоляцію з навколишнього середовища, а також в результаті термоокислювальних процесів. Це різко знижує опір струмів утікання, тому що у волозі містяться розчинені й дисоційовані домішки, тобто вільні іони. Внаслідок цього збільшуються діелектричні втрати і знижується напруга теплового пробою ізоляції. Оскільки вода є сильно полярним діелектриком, що має відносну діелектричну проникність $\epsilon = 81$, що набагато більше, ніж у діелектричних матеріалів, зволоження ізоляції може привести до викривлення електричного поля і зниження напруги її пробою.

Незначна кількість води (10-20) г на 1 т масла значно знижує короточасну електричну міцність ізоляції. Для запобігання цьому використовують герметичні конструкції, захисні пристрої, осушувачі масла, гнучкі діафрагми. Здійснюють періодичний контроль ступеня зволоження ізоляції.

3.6.4. Теплове старіння ізоляції

У діелектричних матеріалах при $T = 60 \div 130^\circ\text{C}$ починаються хімічні реакції за участю електродів (мідь сприяє окисленню масла). У результаті змінюється

структура матеріалу діелектрика і зменшується електрична міцність – це так зване теплове старіння ізоляції.

Для твердих діелектриків характерне поступове зниження механічної міцності, руйнування структури і пробій. У рідких діелектриках при тепловому старінні утворюються газоподібні, а у рідких рідкі й тверді продукти реакцій, що збільшують провідність і діелектричні втрати і знижують електричну міцність ізоляції. У комбінованій ізоляції під дією температури погіршуються як механічна міцність, так і електричні характеристики.

Інтенсивність теплового старіння обумовлена швидкістю V протікання хімічних реакцій, що залежать від температури і визначається рівнянням Арреніуса:

$$V = V_0 \cdot \exp\left(\frac{W_A}{kT}\right) \quad (3.4)$$

де W_A – енергія активації для даної реакції;

k – постійна Больцмана;

T – абсолютна температура.

Вважають, що термін служби ізоляції τ при тепловому старінні зворотно пропорційний швидкості хімічної реакції. Тоді відношення термінів служби при різних температурах T_1 і T_2 :

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = 2 - \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta T} \quad (3.5)$$

де τ_1, τ_2 – терміни служби при T_1 і T_2 ;

ΔT – підвищення температури, що скорочує термін служби ізоляції в 2 рази. У середньому для різних видів ізоляції $\Delta T \approx 10^\circ\text{C}$.

Встановлені значення допустимої робочої температури ізоляції $T_{др}$ нормуються введенням 7 класів нагрівостійкості (табл.3.4).

Таблиця 3.4. Класи нагрівостійкості ізоляції.

Y	A	E	B	F	H	C
90°	105°	120°	130°	155°	170°	180°

Таким чином, між терміном служби ізоляції та напруженістю електричного поля, яке прикладене до ізоляції, існує функціональна залежність (рис.3.19). При відносно малих значеннях напруженості (коли в ізоляції відсутні часткові розряди, які приводять до ерозії діелектриків) залежність терміну

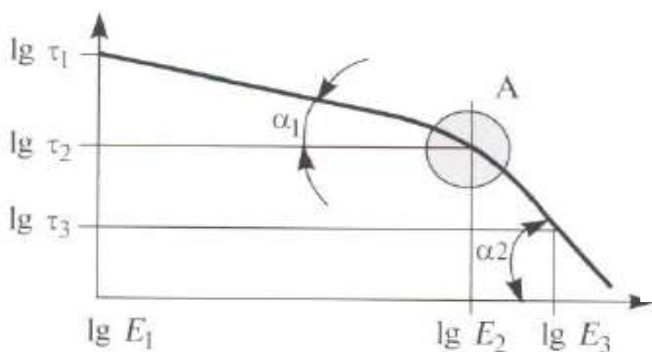


Рис.3.19 Залежність терміну служби ізоляції τ від напруженості електричного поля E , яка прикладена до ізоляції

служби від напруженості незначна (ділянка $\lg E_1 - \lg E_2$ на рис.3.19) і визначається гілкою з нахилом α_1 . Зона А вигину залежності $\lg \tau = f(\lg E)$ характеризується виникненням інтенсивних часткових розрядів, після чого руйнування ізоляції зростає (кут нахилу α_2 збільшується) і термін служби зменшується.. Тобто інтенсивність часткових розрядів суттєво впливає на термін служби ізоляції.

3.7 Методи контролю та профілактики високовольтної ізоляції

3.7.1 Задача та мета профілактики

Профілактика – це система заходів за допомогою яких забезпечується надійна робота ізоляції в процесі експлуатації. Профілактика проводиться для виявлення дефектів, які виникають в високовольтній ізоляції при експлуатації. Послаблення діелектричних властивостей ізоляції виникає в наслідок наступного:

- загального старіння ізоляції.
- виникнення локальних дефектів в ізоляції.

Загальне старіння ізоляції пронизує значний об'єм ізоляції. Тоді як локальні дефекти виникають у вигляді скупчення мікротріщин, повітряних включень, часткової вологості ізоляції. У більшій частині ці дефекти не можуть бути знайдені при простому огляді ізоляції, то необхідне мати систему профілактичного тестування високовольтної ізоляції. Вплив основних зовнішніх факторів на змінення характеристик ізоляції наведений в табл.3.5 і показує, що для надійної роботи високовольтної ізоляції необхідне регулярне проведення профілактичного тестування ізоляції.

Табл.3.5 Змінення характеристик ізоляції від основних зовнішніх факторів

Фактор	Змінення в ізоляції
Зволоження	Зменшення опору Збільшення ємності Підвищення температури Підвищення тиску у вводах Зниження пробивної напруги рідкого діелектрика Змінення хімічного складу рідкого діелектрика Виникнення часткових розрядів
Забруднення	Зменшення опору Збільшення $\tan \delta$ Підвищення температури Зниження пробивної напруги рідкого діелектрика Змінення хімічного складу рідкого діелектрика Виникнення часткових розрядів
Перенапруги	Пробій ізоляції Виникнення часткових розрядів
Перегрів	Зменшення опору Збільшення $\tan \delta$ Підвищення тиску у вводах

	Змінення хімічного складу рідкого діелектрика Виникнення часткових розрядів
Коротке замикання	Значні термічні та динамічні дії на ізоляцію

Профілактичне тестування ізоляції різко знижує аварії в енергетичних системах в наслідок своєчасного виявлення дефектів ізоляції.

Таким чином, завдання профілактика наступні:

1. Утворювати нормальні умови експлуатації високовольтної ізоляції.
2. Своєчасне виявлення дефектів ізоляції та їх усунення.
3. Вивчення фізичних особливостей та причин появи дефектів ізоляції.
4. Розробка ефективних методів проведення профілактики.

В таблиці 3.6 наведені основні методи профілактичного тестування високовольтної ізоляції та приведена їх загальна характеристика.

Таблиця 3.6 Основні методи профілактичного тестування високовольтної ізоляції

№/№	Метод тестування ізоляції	Дефекти, які виявляються даним методом	Загальна характеристика методу
1	Вимірювання опору ізоляції	Крізні провідні шляхи чи пробій	Один з основних методів
2	Вимірювання $tg\delta$	Процеси іонізації та загальне старіння ізоляції	Один з основних методів
3	Вимірювання ємності	Загальне зволоження ізоляції	В основному для контролю зволоження трансформаторів та електричних машин
4	Визначення наявності часткових розрядів	Процеси іонізації в повітряних включеннях	Додатковий метод (зараз поширюється)
5	Вимірювання розподілу напруги	Частковий пробій, некрізні струми утікання	Основний метод для гірлянд ізоляторів
6	Прикладання підвищеної напруги	Локальні дефекти при зниженні електричної міцності	Контроль мінімального запасу електричної міцності

3.7.2 Вимірювання опору ізоляції (струмів утікання)

Цей метод внаслідок своєї простоти знайшов поширене використання при тестуванні ізоляції і є одним з основних методів контролю якості ізоляції.

Неоднорідну ізоляцію можна уявити як складену з двох шарів різної питомої провідності γ і діелектричної проникності ϵ (рис 3.20). При включенні постійної напруги U на межі шарів накопичується заряд абсорбції. Якщо ізоляція однорідна, то:

$$R_1 C_1 = R_2 C_2 \quad \text{та} \quad \frac{\epsilon_1}{\gamma_1} = \frac{\epsilon_2}{\gamma_2} \quad (3.6)$$

Тоді величини r і ΔC , які визначаються через параметри шарів діелектрика як:

$$r = \frac{R_1 R_2 (R_1 + R_2) \cdot (C_1 + C_2)^2}{(R_1 C_1 - R_2 C_2)}; \quad \Delta C = \frac{(R_1 C_1 - R_2 C_2)}{(R_1 + R_2)^2 \cdot (C_1 + C_2)^2}, \quad (3.7)$$

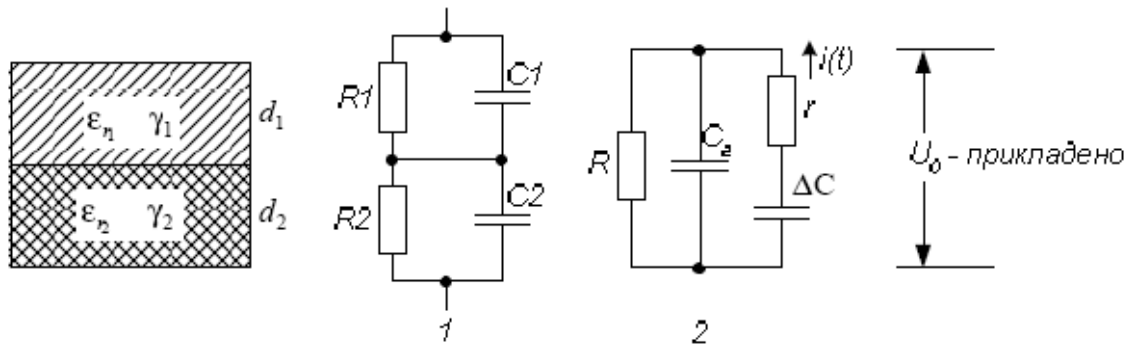


Рис.3.20 Схема заміщення двошарового діелектрика

будуть дорівнювати: $r \rightarrow \infty$, а $\Delta C \rightarrow 0$, оскільки ємності та опір шарів будуть однакові.

Якщо ізоляція неоднорідна то зі схеми заміщення (рис.3.20) випливає, що при підключенні неоднорідної ізоляції до джерела постійної напруги, струм утікання крізь неї повільно змінюється в часі згідно:

$$i = \frac{U}{R} + \frac{U}{r} e^{-\frac{t}{T}} \quad (3.8)$$

де $T = r \cdot \Delta C = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot (C_1 + C_2)}{R_1 + R_2}$ - постійна часу.

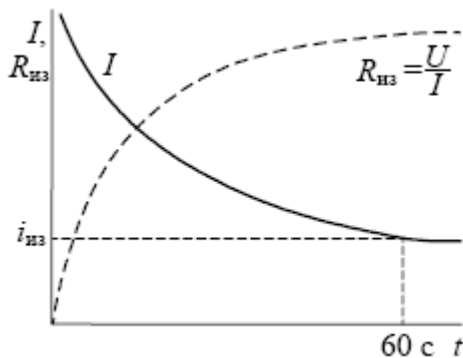


Рис.3.21 Зміна струму утікання та опору ізоляції у часі

Тут перша складова U/R – це сталий струм утікання, а другий член виразу, – це експоненційне загасаюча вільна складова струму, яка називається *струмом абсорбції* (без урахування короточасного струму заряду геометричної ємності).

Тоді опір ізоляції в перехідному режимі змінюється за законом:

$$R(t) = \frac{U}{i(t)} = \frac{R}{1 + \frac{R}{r} \cdot e^{-\frac{t}{T}}}, \quad (3.9)$$

Отже величина опору ізоляції R і струму утікання змінюється у часі (рис.3.21). При випробуванні вимірюють мегомметром опір ізоляції R через 15 і 60 с після включення напруги (R_{15}, R_{60}). Враховують абсолютне значення R_{60} і визначають коефіцієнт абсорбції: $k_{abc} = R_{60} / R_{15}$.

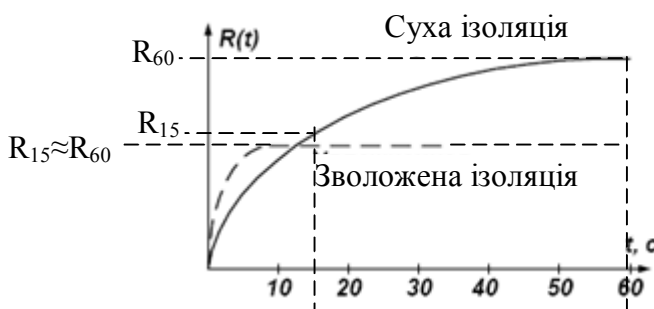


Рис.3.22 До виміру коефіцієнта абсорбції

Експериментально встановлено, що припустимим є зволоження ізоляції при $k_{abc} > 1,3$. При $k_{abc} < 1,3$ ізоляція не придатна для експлуатації (рис.3.22). Різке падіння опору ізоляції показує пробій ізоляції, чи наявність значного провідного каналу в об'ємі ізоляції. Звичайно старіння ізоляції цим методом оцінюють шляхом порівняння

с попередніми замірами. Вимірювання опору ізоляції обмоток трансформаторів та електричних машин проводять згідно схем на рис.3.23.

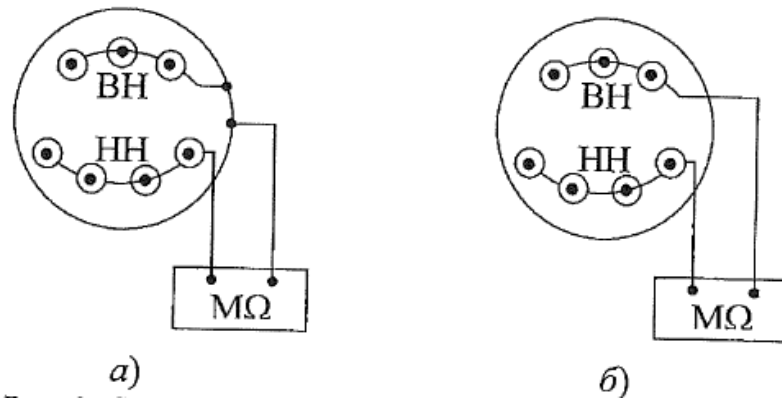


Рис.3.23 Схема вимірювання опору ізоляції обмоток трансформатору:
а – відносно корпусу; б – між обмотками

Для вимірювання опору ізоляції використовують спеціальні мегомметри. Найбільш поширені індукторні мегомметри з ручним приводом типу М-110 на 500 В, МОМ-5 на 1 кВ та МС-06 на 2,5 кВ, а також електронні мегомметри, наприклад ЭСО210. За допомогою омметрів можливо також виявити плоху пайку, плохі контакти, обрив дроту в обмотці (прибор показує різке зростання опору).

На рис.3.24 показана як приклад схема електричної принципової мегомметра типу МС-0,5 на 2,5 кВ. Для зміни чутливості пристрою використовують резистори R_2 та R_3 , які шунтують основний резистор R_1 . При підключенні цих резисторів показання пристрою діляться відповідно на 10 та 100. Шкала пристрою має відмітки від 0 до 10 000 МОм. Конденсатор C_1 згладжує пульсації від індуктора. При роботі пристрою необхідно рівномірно обертати індуктор, який має центробіжний регулятор. Котушки індуктора знаходяться у магнітному полі постійного магніту. При протіканні струму крізь

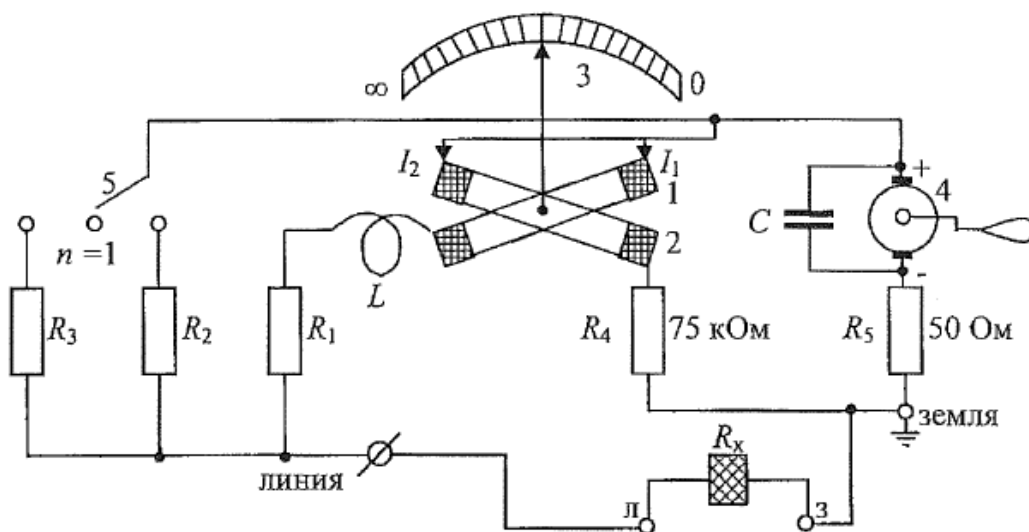


Рис.3.24 Принципова схема мегомметра МС-05:
1,2 – котушки логометра на загальній вісі; 3 – шкала пристрою;
4 – генератор (індуктор); 5 – перемикач меж вимірювання

катушки логометра 1 і 2, який обумовлений підключенням об'єкту вимірювання R_X , виконується обертання цих котушок відносно друг друга. Це обертання однієї з котушок і показує вимірює мий опір ізоляції R_X .

На рис.3.25 наведений зовнішній вигляд деяких сучасних пристроїв для вимірювання опору високовольтної ізоляції. Наприклад, високоомний



Рис.3.25 Мегомметри для вимірювання опору високовольтної ізоляції
А – МІТ2010; б – ПСИ-2500; в – АКИП-8604

вимірювач ізоляції АКИП-8604 дозволяє вимірювати опір ізоляції кабелів в діапазоні від 1 МОм до 30 ТОм з точністю до 5 % при випробувальній напрузі до 15 кВ з регульовим шагом у 500 В та забезпечує автоматичне вимірювання коефіцієнта абсорбції у автоматичному режимі (час вимірювання контролюється таймером).

3.7.3 Контроль вологості ізоляції за допомогою вимірювання ємності

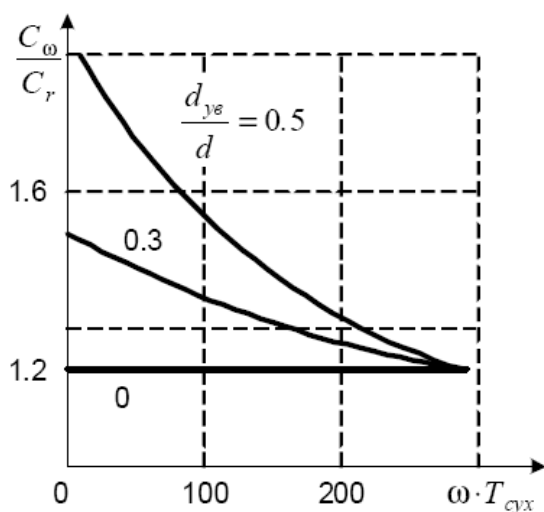


Рис.3.26 Залежність ємності ізоляції від частоти ω при різній товщині d_{ye} зволоженого шару

При змінній напрузі контроль ізоляції здійснюють шляхом виміру ємності згідно еквівалентній схемі, яка наведена на рис.3.20:

$$C(\omega) = C_r + \left(\frac{\Delta C}{1 + \omega^2 \cdot T^2} \right), \text{ де } C_r = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad (3.10)$$

Зі схеми заміщення випливає, що еквівалентна ємність неоднорідного діелектрика залежить від частоти ω і постійної часу T . Оскільки $T = r \cdot \Delta C$ залежить від ступеня зволоження ізоляції, ємність $C(\omega)$ із зростанням частоти змінюється тим більше, чим більша ступінь неоднорідності ізоляції (рис.3.26). Вимір ємності ізоляції здійснюють при двох частотах: $f_1 = 2$ Гц і $f_2 =$

50 Гц. Якщо $C_2/C_{50} > 1,3$, то ізоляція є непридатною для подальшого використання. Але цей метод контролю менш розповсюджений.

Спрощена схема пристрою контролю вологості ізоляції по методу «ємність – частота» наведена на рис. 3.27 а (пристрої типу ПКВ-7, ПКВ-13). За допомогою перемикача Π зразок C_X періодично підключається до джерела постійної напруги U_0 (зразок C_X заряджається), а потім до ланцюга з гальванометром (зразок C_X заряджається). Струм I , який протікає в розрядному ланцюгу крізь гальванометр, пропорційний ємності зразка при заданій частоті,

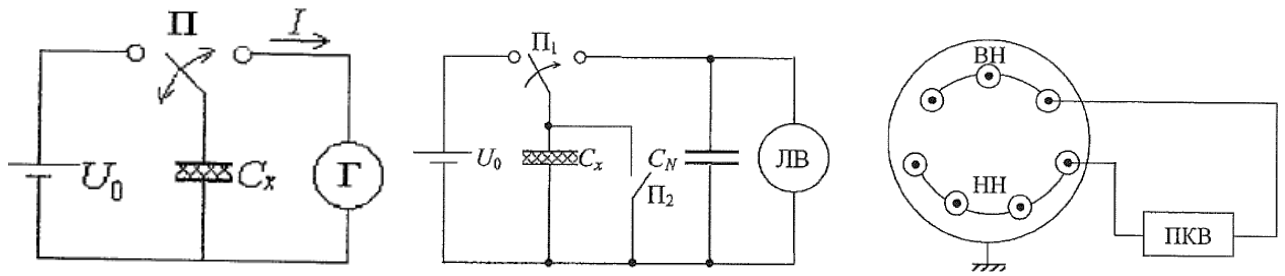


Рис.3.27 Спрощені схеми вимірювання вологості ізоляції:
а – метод «ємність – частота»; б – метод «ємність – час»; в – використання методів до вимірювання вологості обмоток трансформатора

тобто $I_f = U_0 \cdot C_f \cdot \omega$ Тоді відношення ємностей при заданих частотах перемикання 2 и 50 Гц дорівнює:

$$\frac{C_2}{C_{50}} = \frac{50}{2} \cdot \frac{I_2}{I_{50}} \quad (3.11)$$

Контроль ступені вологості ізоляції можна проводити і за методом «ємність – час», який заснований на роздільному вимірюванні геометричної та абсорбційної ємності та знаходженні відношення $\frac{C_{ABC}}{C_G}$. Приклад спрощеної схеми такого пристрою наведений на рис. 3.24 б. (пристрої типу ПКВ-13, ЕВ-3). Вимірюваний зразок C_X заряджається біля 1 хвилини від джерела постійної напруги U_0 . Після чого за допомогою перемикача Π_1 зразок підключається до еталонного конденсатора C_N , який сприймає за указаний час тільки геометричну ємність зразка. Звичайно $C_N \gg C_X$, тому напруга прямо пропорційна геометричній ємності зразка C_G :

$$U_{N1} = U_0 \frac{C_G}{C_G + C_N} \approx U_0 \frac{C_G}{C_N} \quad (3.12)$$

Напруга на еталонній ємності C_N замірюється за допомогою вольтметра з великим вхідним опором.

Для вимірювання абсорбційної ємності C_{ABC} зразок знову заряджають від джерела U_0 . Потім відключений зразок перемикачем Π_1 замикають накоротко на час 5-10 мс, що приводить до розрядки геометричної ємності зразка. Після цього перемикачем Π_1 ємність C_X підключають до вимірювального ланцюга на 1 с.

Еталонний конденсатор C_N заряджається від абсорбційної ємності зразка C_{ABC} . Напруга на C_N буде пропорційна:

$$U_{N2} = U_0 \frac{C_{\Gamma}}{C_{\Gamma} + C_N} \approx U_0 \frac{C_{ABC}}{C_N}, \quad (3.13)$$

а відношення: $\frac{U_{N2}}{U_{N1}} = \frac{C_{ABC}}{C_{\Gamma}}$ порівнюють з нормованим значенням, звідки роблять висновок о ступені вологості ізоляції.

На рис.3.27 в наведений приклад вимірювання вологості ізоляції обмоток трансформатора.

3.7.4 Контроль ізоляції за тангенсом кута діелектричних втрат

Вимірювання тангенса кута діелектричних втрат ($\text{tg}\delta$) є найбільш ефективним методом контролю якості ізоляції, оскільки її погіршення призводить до збільшення діелектричних втрат. Діелектричні втрати при дії на ізоляцію змінної напруги обумовлені струмами провідності й поляризації (зміщення). Оскільки струм зміщення містить активну складову, то процес поляризації супроводжується розсіюванням енергії в ізоляції.

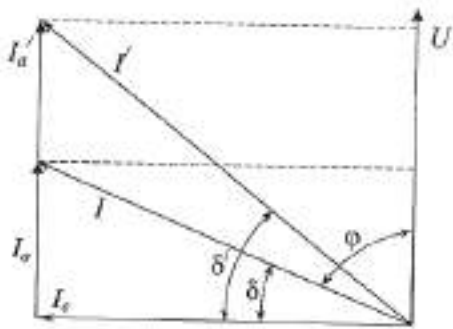


Рис.3.28 Векторна діаграма струмів крізь діелектрик з втратами

Повний струм, який протікає крізь ізоляцію здвигнутий по відношенню до напруги на кут і накладається на активну та реактивну складові (рис.3.28). Тангенс куту діелектричних втрат уявляє собою відношення активної складової струму до реактивної:

$$\text{tg}\delta = \frac{I_A}{I_P} \quad (3.14)$$

Повна потужність діелектричних втрат в об'ємі діелектрика складає:

$$P_{AKT} = I_C \cdot U \cdot \text{tg}\delta = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \text{tg}\delta \quad (3.15)$$

Це дозволяє замість вимірювання діелектричних втрат вимірювати $\text{tg}\delta$, який можливо заміряти безпосереднє мостом змінної напруги.

Вимірювання $\text{tg}\delta$, а не значення самих діелектричних втрат має свої переваги:

1. Величина $\text{tg}\delta$ як характеристика матеріалу не залежить від розмірів об'єкту, але дозволяє виявляти дефекти, які виникли в ізоляції, особливо, якщо вони розповсюдженні по усьому об'єму.
2. Величина $\text{tg}\delta$ може бути безпосередньо заміряна мостом змінного струму.

Метод контролю ізоляції шляхом вимірювання величини $\text{tg}\delta$ є ефективним і розповсюдженим. Він дозволяє виявляти наступні дефекти: вологість ізоляції, наявність повітряних (газових) включень з процесами іонізації, неоднорідності, забруднення та ін.

Вимірювання $\operatorname{tg} \delta$ здійснюється високовольтним мостом (міст Шерінга), включеним по нормальній (якщо обидва електроди об'єкта ізолювані) або «перевернутій» схемам (один електрод об'єкта заземлений). Слід мати на увазі, що при використанні перевернутого мосту, до вимірювального об'єкту ідуть дроти, які знаходяться під високою напругою.

Міст складається з двох пліч, в одному з яких знаходяться змінні еталонні ємність C_e і резистор R_e , а в другому – досліджуваний об'єкт з невідомими параметрами C_x і R_x . При досягненні рівності струмів в обох плечах мосту (що фіксується гальванометром, включеним в діагоналі моста), значення параметрів C_x і R_x дорівнюють відповідним еталонним величинам.

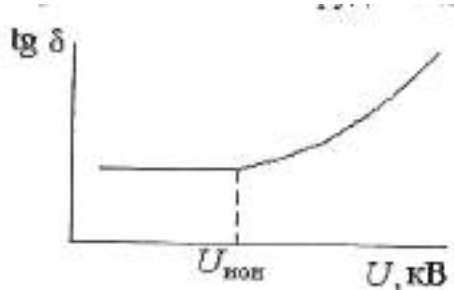


Рис.3.29 Іонізаційна крива при вимірюванні $\operatorname{tg} \delta$

Метод заснований на вимірюванні залежності $\operatorname{tg} \delta = f(U)$. Напруга, яка відповідає початку іонізації, відповідає початку зростання $\operatorname{tg} \delta$, а точка перегину залежності $\operatorname{tg} \delta = f(U)$ і є напруга початку іонізації (рис.3.29).

Для вимірювання $\operatorname{tg} \delta$ при високій напрузі використовуються мости змінного струму типу МД-16, Р-507, Р-521, Р-595, Р-5026 та ін., які побудовані за схемою Шерінга. На рис. 3.27 наведений пристрій чотирьох плечового рівноважного високовольтного вимірювального мосту змінного струму, який виконаний за схемою Шерінга.

На рис. 3.30 а C_x - випробовувана ізоляція, що заміщається паралельною схемою $C_x R_x$, C_0 - зразковий повітряний конденсатор, що має малі діелектричні втрати, R_3 - магазин опорів (набір зразкових резисторів), R_4 - зразковий резистор, C_4 - магазин ємностей (набір зразкових конденсаторів). Буквою Т позначений високовольтний трансформатор, що живить схему моста, НІ - нуль-індикатор, що служить для урівноваження мосту, FV1, FV2 - низьковольтні розрядники, що захищають низьковольтну частину моста при пробі випробовуваної ізоляції, Э - екран, роль якого пояснена далі при розгляді перевернутої схеми моста.

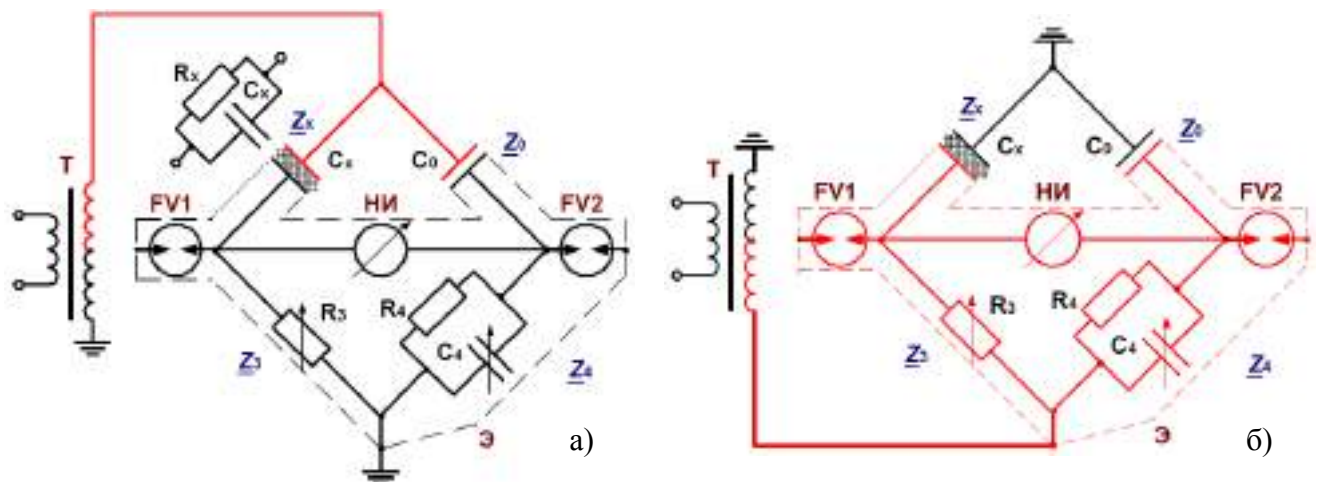


Рис.3.30 Принципова схема мосту Шерінга для відмірюванні $\operatorname{tg} \delta$:
а – пряма; б - перевернута

Відміними особливостями моста за схемою Шерінга є висока напруга живлення моста і досить хороша збіжність моста при його урівноваженні. Остання обставина для мосту змінного струму, який працює на синусоїдальній напрузі і вимагає для збіжності вирівнювання модулів і фаз потенціалів, на вимірювальній діагоналі моста, має найважливіше значення.

Умовою рівноваги чотирьохплечового моста, як відомо, являється рівність добутку опорів протилежних плечей, тобто:

$$Z_X \cdot Z_4 = Z_0 \cdot Z_3$$

Це комплексне рівняння добутку опорів розкладається на два рівняння з яких отримують співвідношення для C_X та $\operatorname{tg} \delta$:

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_4 R_4 \text{ та } C_X = C_0 \frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}.$$

Якщо, $\operatorname{tg} \delta \ll 1$, то $C_X = C_0 \frac{R_4}{R_3}$

При конкретному значенні R_4 шкалу магазину ємностей C_4 можна проградувати в одиницях $\operatorname{tg} \delta$.

У нормальній схемі моста (рис.3.30 а) обидва електроди випробовуваної ізоляції ізольовано від землі. Часто при проведенні випробувань випробовуваний об'єкт має заземлений електрод, який складно від'єднати від заземлених ланцюгів, і в цих випадках для вимірів використовується перевернута схема моста Шерінга, яка зображена на рис.3.30 б.

У разі перевернутої схеми нижні елементи схеми знаходяться під високим потенціалом. Оскільки усі ці елементи розташовані усередині заземленого корпусу, то на паразитних ємностях елементів по відношенню до корпусу є висока напруга, в наслідок чого виникають паразитні струми, які призводять до неможливості правильного урівноваження моста чутливим нуль-індикатором. Ця проблема вирішується установкою усередині заземленого корпусу додаткового екрану $\mathcal{E}$, що з'єднаний з нижньою точкою моста і має завжди той же потенціал, що і вимірювальні елементи моста. При цьому на паразитних ємностях усередині екрану напруги і в нормальній, і в перевернутій схемі завжди дуже невеликі потенціали.

Недоліком методу вимірювання $\operatorname{tg} \delta$ є те що він фіксує не початок розрядів, а початок інтенсивного процесу циклів розрядів, які виникають на сукупності дефектів.

На рис.3.31 наведений зовнішній вигляд деяких вимірювачів високовольтної ізоляції на основі моста Шерінга. Наприклад, міст МЕР-5СА складається з блоку вимірювання 1, блоку управління 2 та блоку живлення 3 та призначений для вимірювання в автоматичному режимі електричної ємності та тангенсу куту діелектричних втрат з напругою на діагоналі мосту до 10 кВ при використанні як прямої так і перевернутої схеми Шерінга. Діапазон значень $\operatorname{tg} \delta$ складає $1 \cdot 10^{-4} \dots 1$. Діапазон вимірювання ємності – $20 \dots 10^5$ пФ. Частота вимірювання 48,8...61, 2 Гц



Рис.3.31 Прибори для вимірювання ємності та $\operatorname{tg} \delta$ на основі високовольтного моста змінного струму Шерінга

а – МЕР-5СА; б – СА-7100-2

1 – блок вимірювання; 2 – блок управління; 3 – блок живлення; 4 – еталонний конденсатор

3.7.5 Контроль ізоляції за інтенсивністю часткових розрядів

В основу цього метода контролю покладено зовнішню прояву часткових розрядів – зниження при кожному частковому розряді напруги на ізоляції стрибком на величину ΔU , яка пропорційна енергії $W_{чр}$. Стрибок напруги ΔU_x пов'язаний з тим, що в каналі часткового розряду розсіюється частка енергії, що запасена в електричному полі ізоляції:

$$\Delta W_{чр} = C_x \frac{U^2}{2} \quad (3.16)$$

де – C_x – ємність досліджуваної ізоляції; U – напруга в момент появи часткового розряду

Враховуючи, що $\Delta U_x \ll U$, отримаємо: $W_{чр} \approx \Delta U \cdot C_x \cdot U$.

Таким чином, стрибок напруги ΔU_x на ізоляції пропорційний енергії часткового розряду. Це було розглянуте раніш в розділі 2.3.1..

Існуючі вимірювальні установки для проведення контролю дозволяють фіксувати як інтенсивність (амплітуду), так і частоту виникнення окремих часткових розрядів, що дає змогу об'єктивно оцінити якість ізоляції. В основу таких пристроїв покладено вимірювання заряду, який пропорційний ΔU_x . Якщо ці пульсації ΔU_x підсилити, то їх можливо побачити на екрані осцилографа.. По моменту вимкнення пульсацій на екрані осцилографа визначають напругу виникнення іонізації, а по амплітуді та частоті пульсацій – інтенсивність часткових розрядів.

Існує декілька варіантів таких схем таких пристроїв.

1. Схема з активним опором (рис.3.32).

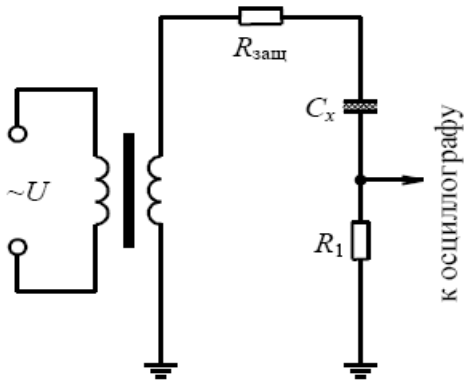


Рис.3.32 Схема визначення часткових розрядів за допомогою активного опору:
 C_1 – досліджуємий об'єкт; R_1 – активний резистор; $R_{зашч}$ – захисний резистор

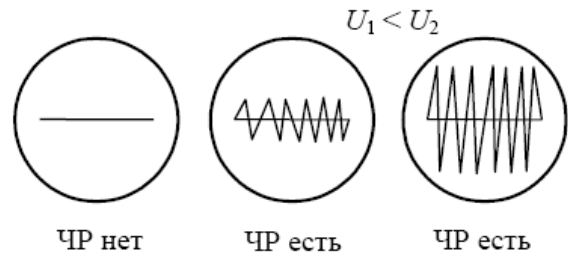


Рис.3.33 Вид осцилограм при відсутності та різній інтенсивності часткових розрядів

Резистор R_1 підключається послідовно з досліджуємим об'єктом, падіння напруги на ньому реєструється індикатором часткових розрядів. На екрані осцилографа можна бачити різні картини в залежності від надійності ізоляції (рис.3.33). Недоліком такої схеми є мала перешкодостійкість.

2. Схема з використанням коливального контуру (рис.3.34).

Як було показано раніш при виникненні часткових розрядів виявляються високочастотні коливання з амплітудою ΔU_x . Індикатор часткових розрядів ИЧР, який має коливальний контур LC настроєний на частоту декілька десятків кГц, підключають до об'єкту за допомогою роздільного конденсатора $C_{разд}$. При виникненні часткового розряду в об'єкті C_x хаотичні коливання напруги на об'єкті збуджують в контурі незатухаючі коливання з резонансною частотою контуру. Амплітуда цих коливань вимірюється гальванометром Γ , що дає змогу знайти інтенсивність іонізації.

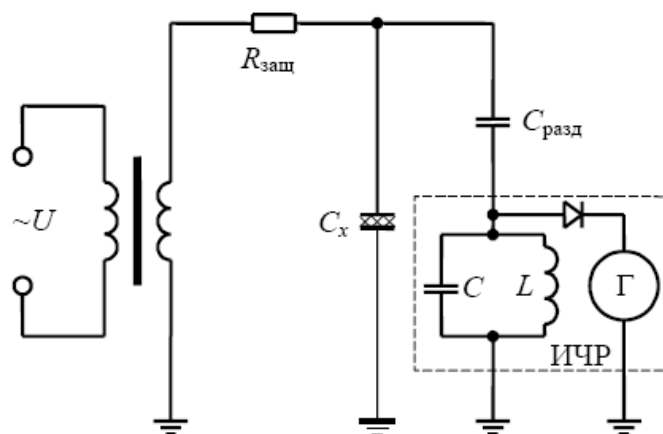


Рис.3.34 Спрощена схема визначення часткових розрядів за допомогою коливального контуру

C_x – досліджуємий об'єкт; $C_{разд}$ – розподільний конденсатор; $R_{зашч}$ – захисний резистор; LC – коливальний контур; Γ - гальванометр

Якщо ці коливання підсилити широкосмуговим підсилювачем, то їх можливо побачити на екрані осцилографа. По моменту виникнення ВЧ пульсацій на екрані осцилографа визначають напругу появи іонізації, а за частотою їх повторювання оцінюють інтенсивність іонізації.

Використання методу виявлення часткових розрядів, як одного з методів контролю та профілактики ізоляції, є перспективним, оскільки він дозволяє безперервний контроль ізоляції під робочою напругою. Але слід відмітити і недоліки цього методу:

- наявність значної кількості перешкод, які затрудняють розшифровку отриманих результатів (іскріння колекторів електричних машин, виникнення коронного та іскрового розрядів та ін..).
- метод фіксує не наявність дефекту, а виникнення часткового розряду в ньому. Якщо дефект зволожений (наприклад, тріщина), то частковий розряд в ньому не виникне.

3.7.6 Контроль ізоляції підвищеною напругою

Випробування підвищеною напругою дозволяє виявити багато дефектів, особливо зосереджених, що не встановлюються іншими методами, але можуть викликати пробій у неушкодженій ізоляції. Тому профілактичні й післяремонтні випробування підвищеною напругою проводять після контролю її спочатку неруйнівними методами, а величина випробувальної напруги має бути на (10...15)% нижчою встановленої норми для нового електрообладнання. Ізоляція вважається такою, що витримала випробування, якщо не відбулося пробою, часткових пошкоджень, не спостерігається диму, газу, звуку та інших ознак. Тривалість випробування – тричі по 1 хвилині.

Іноді застосовують прискорені випробування напругою підвищеної частотою $f=100...250$ Гц. При цьому кількість часткових розрядів в ізоляції за секунду збільшується, діелектричні втрати зростають, швидко розвивається електричний або тепловий пробій, тому час випробувань t зменшують:

$$t = 60 \cdot \frac{100}{f}, \text{ (але не менше 20 с.)}$$

Випробування постійною підвищеною напругою використовують для об'єктів великої ємності (кабелів, конденсаторів). У цьому випадку струм через ізоляцію малий (дорівнює $I_{вит}$), відповідно, втрати потужності малі і тепловий пробій утруднений, тому потрібна більш висока напруга для визначення дефектної ізоляції.

Тестування підвищеною напругою гарантує також те, що ізоляція має необхідний резерв міцності по відношенню до перенапруг, які мають місце при експлуатації ізоляції. На рис.3.35 наведена спрощена схема обладнання для тестування ізоляції підвищеною напругою.

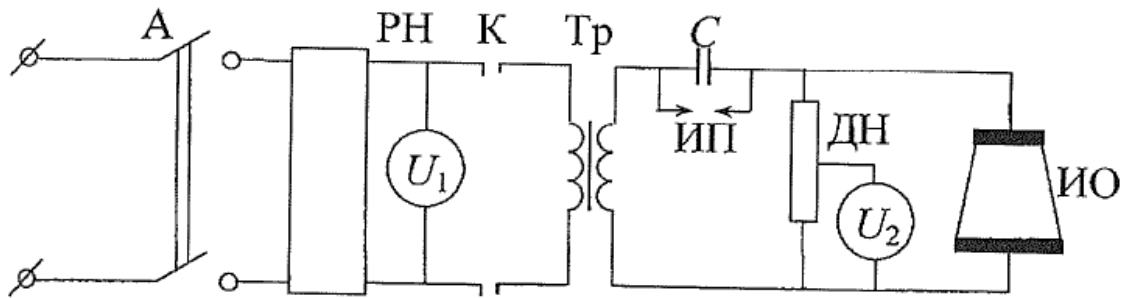


Рис.3.35 Спрощена схема обладнання для тестування ізоляції підвищеною напругою:
 А – автоматичний вимикач; РН – регулюючий трансформатор; К – контактор; Тр – високовольтний трансформатор; U_1 , U_2 - кіловольтметри; С – ємність продольної компенсації; ИП – іскровий захисний розрядник; ДН – дільник напруги; ИО – досліджуємий об'єкт;

3.7.7. Моніторинг стану високовольтної ізоляції

В наступний час існують системи безперервного моніторингу стану високовольтної ізоляції, яка знаходиться під напругою, за допомогою реєстрації та обробки спектру часткових розрядів. Є два різновиду систем контролю і моніторингу стану високовольтної ізоляції високовольтних кабельних ліній. Перша система працює на основі теплового контролю, а друга – на основі реєстрації і аналізу часткових розрядів в ізоляції..

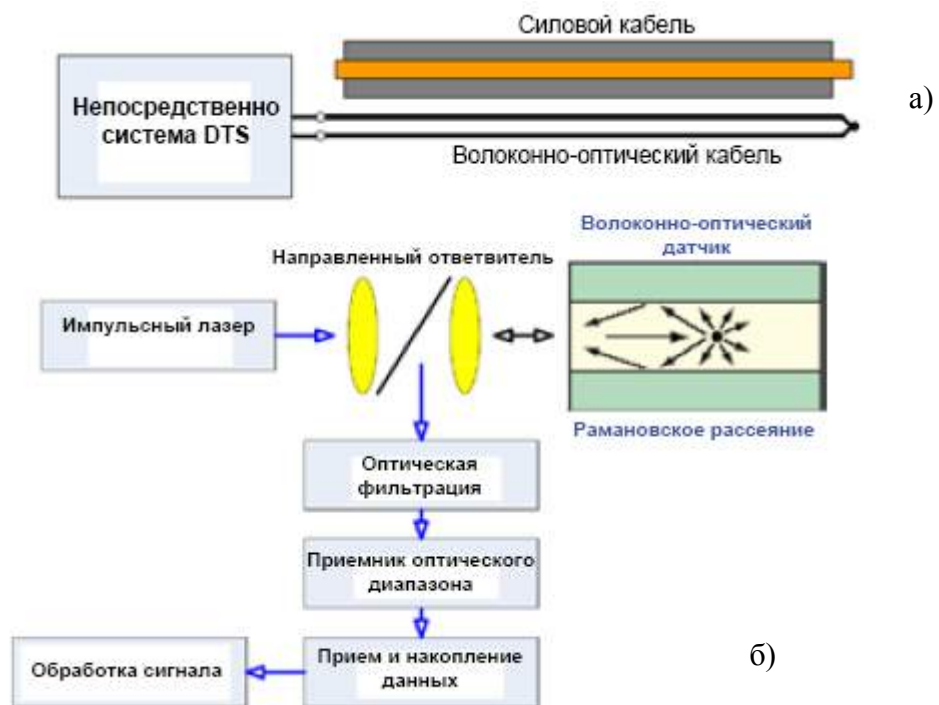


Рис.3.36 Принцип роботи системи DTS (а) ти схема ініціювання і аналізу зворотних пучків розсіяного світла (б)

Перший метод моніторингу більш привабливий для контролю теплового експлуатаційного навантаження кабелю, а другий має максимальну чутливість для діагностики дефектів ізоляції.

3.7.7.1 Моніторинг теплового стану високовольтної ізоляції

Для контролю теплового стану ізоляції високовольтного кабелю в наступний час використовують систему DTS (Distributed Temperature Sensing – распределенный температурный датчик). При використанні цього методу лазерний імпульс посиляється вздовж волоконо-оптичного датчика, а потім аналізується в відбитому пучку світла в синій або УФ області (рис.3.36).

Якщо послати лазерний сигнал вдовж ізоляції високовольтного кабелю, то фотони цього сигналу будуть поглинатися молекулами матеріалу ізоляції. При цьому можливі три варіанти взаємодії (рис.3.37):

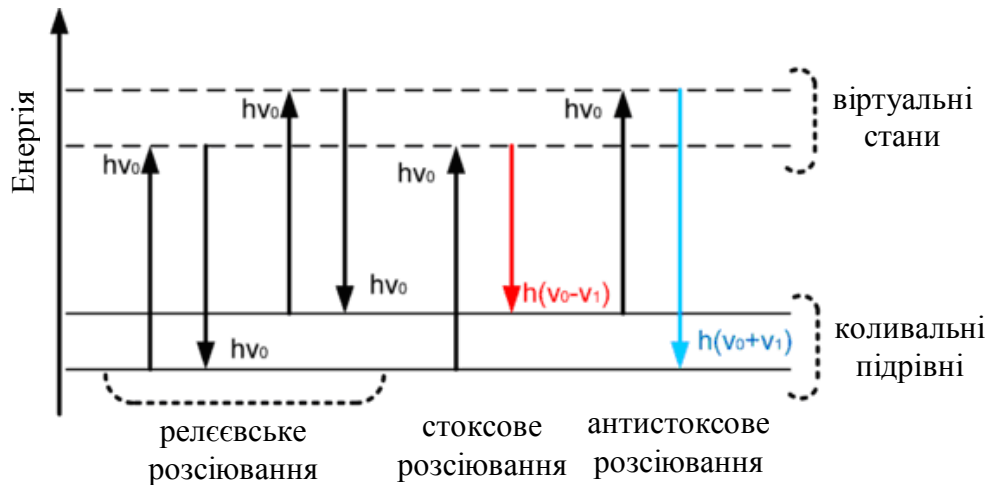


Рис.3.37 Варіанти взаємодії фотонів випромінювання з молекулами ізоляції

- релеєвське розсіювання – коли молекули пружно взаємодіють з фотоном випромінювання і не змінюють своєї енергії;
- стоксове розсіювання – коли молекули, що взаємодіють з фотоном, збуджуються і їх енергія збільшується на ΔE , що приводить до зменшення енергії відбитого фотону до $h\nu - \Delta E$;
- антистоксове розсіювання – коли молекули, що взаємодіють з фотоном, після збудження випромінюють новий фотон з енергією ΔE , що приводить до збільшення енергії відбитого фотону до $h\nu + \Delta E$;

Стоксова смуга не залежить від температури середовища, тоді як антистоксова смуга залежить від температури і несе в собі інформацію о зміні температури вздовж поверхні високовольтної ізоляції. Локальна температура визначається по відношенню рівнів інтенсивності стоксового та антистоксового світлового сигналу. Для кабельної лінії довжиною до 10 км просторова розподільна здібність досягає 1 м.

Таким чином, аналізуючи зсув частоти стоксового та антистоксового випромінювання, їх амплітуду та ширину, можливо отримати інформацію о температурі в даній точки поверхні високовольтної ізоляції (рис.3.38).

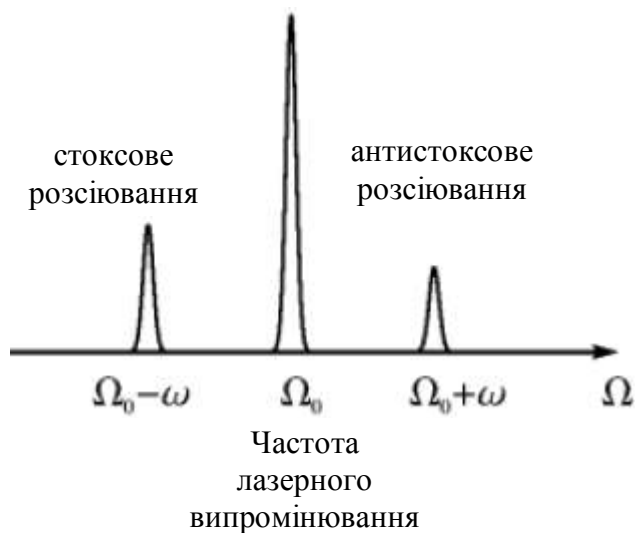


Рис.3.38 Енергетичний спектр взаємодії фононів випромінювання з молекулами ізоляції

Для цього вздовж високовольтного кабелю прокладають оптоволоконний кабель, по якому періодично посиляється лазерний імпульс, а потім аналізується спектр відбитого сигналу.

Використання цього методу потребує окремого оптоволоконна, яке розташовується вздовж кабельної лінії (рис.3.39 а), або використовують спеціальний високовольтний кабель в якому вбудована опто-волоконна лінія (рис.3.39 б).



Рис.3.39 Розташування окремого оптичного волокна в кабельних трасах (а) та конструкція спеціального силового високовольтного кабелю з оптичним волокном (б)

Для кабельних ліній довжиною до 10 км використовують багатомодове оптичне волокно, а для ліній до 20 км – одномодове оптичне волокно. Синхронізуючи посилку лазерного сигналу та відбитого сигналу можливо визначати температуру на поверхні кабелю з просторовим розрішенням до 2-5 м та точністю виміру температури до 1°C . Час вимірювання складає від 2 до 30 сек. Діапазон вимірювання температури від -55°C до 300°C .

3.7.7.2 Моніторинг стану високовольтної ізоляції на основі аналізу часткових розрядів

Найбільш ефективним для оцінки дефектності ізоляції є метод, який заснований на основі реєстрації і аналізу часткових розрядів в ізоляції. Це обумовлено тим, що розвиток практично всіх видів дефектів в високовольтній ізоляції супроводжується появою часткових розрядів різної інтенсивності. Цей метод в наступний час дозволяє проводити безперервний моніторинг кабельної силової лінії, яка знаходиться в експлуатації під робочою напругою.

Для реєстрації часткових розрядів найбільш ефективно використання первинних датчиків та апаратури аналізу, які працюють в діапазоні частот від 150 кГц до 30 МГц. Воно дозволяє контролювати стан ізоляції високовольтного кабелю та стан кінцевих та з'єднувальних муфт.

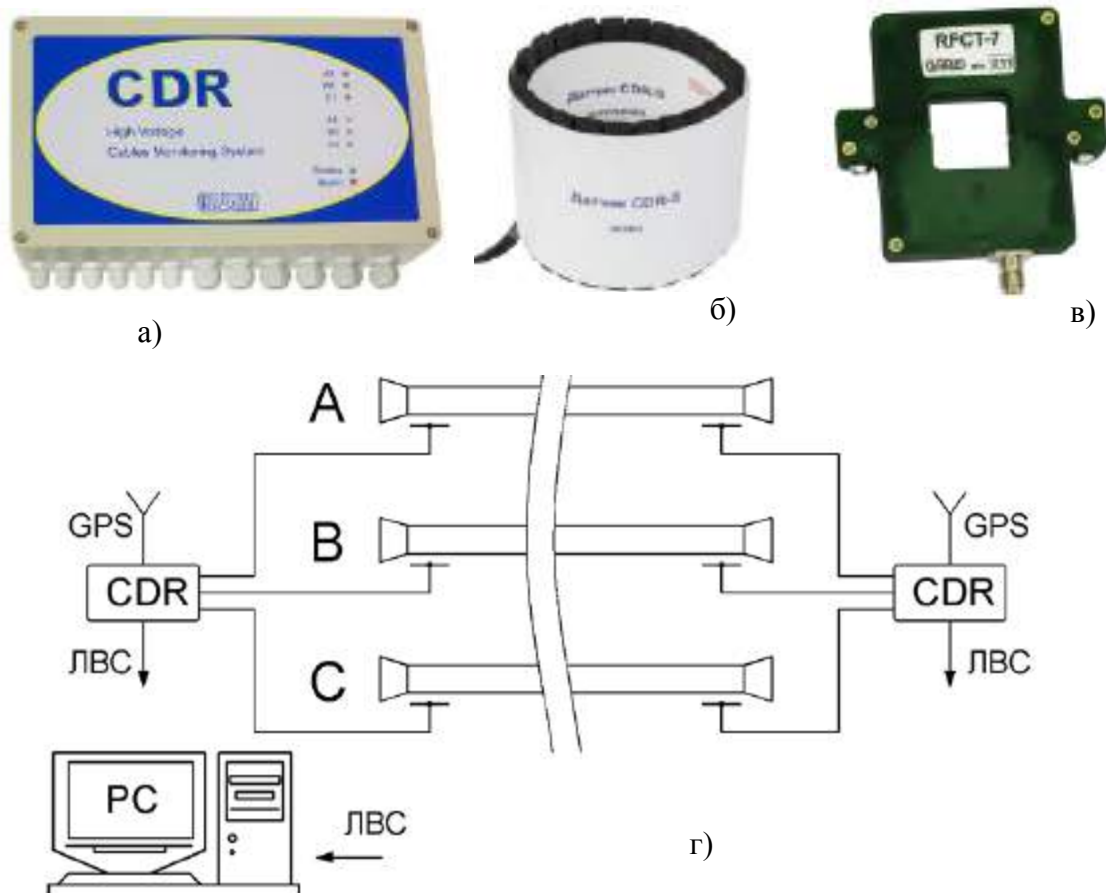


Рис.3.40 Система моніторингу за інтенсивністю часткових розрядів типу CDR
а – о вимірювальний блок; б – комплексний датчик часткових розрядів типу CDR-S;
в – датчики трансформаторного типу RFCT; г – система моніторингу з синхронізацією за сигналами часу від GPS. ЛВС – лінія волоконного зв'язку.

Такі сучасні системи дозволяють:

- Визначати місце виникнення дефектів в кабельній лінії за рахунок складних методів аналізу різниці у часі реєстрації імпульсів за двома чи більш вимірювальними каналами;
- Точно визначати дефектний кабель на основі аналізу амплітуд основних імпульсів, та імпульсів які наведені на контролює мий кабель з сусідніх кабелів;
- Діагностувати тип дефекту, який виник у ізоляції та ступень його розвитку та небезпеки для подальшої експлуатації на основі аналізу фазового та кількісного розташування зареєстрованих імпульсів часткових розрядів;
- Виявляти в кабельній лінії місце виникнення дефекту в ізоляції, використовуючи аналіз графіку розподілення у часі прямих та відбитих імпульсів часткових розрядів;

Розглянемо систему моніторингу за інтенсивністю часткових розрядів на прикладі комплексного пристрою типу CDR (Cables Diagnostics Relay), яка призначена для контролю і моніторингу дефектів ізоляції високовольтних кабельних ліній (рис.3.40). В цю систему вбудовані два сучасних метода локалізації дефекту в ізоляції: аналізу рефлектограм розділення імпульсів часткових розрядів в лінії та метод аналізу різниці за часом приходу високочастотного імпульсу дефекту к кінцям контролюємої кабельної лінії. Останній потребує синхронізації пристроїв у часі. Для цього використовують або опто-волокону лінію, або сигналів часу від GPS.

В якості датчиків сигналів в цій системі використовується або комплексні датчики часткових розрядів типу CDR-S, які встановлюються на зовнішній поверхні силового кабелю, або датчики трансформаторного типу RFCT, які встановлюються на дроті, який заземлює броню кабелю. Обидва типа датчиків працюють у ВЧ діапазоні і тому чутливі до дефектів, які розташовані на відстані до декілька кілометрів.

Система моніторингу кабельної лінії при синхронізації від сигналів часу від GPS наведена на рис.3.40 г. В ній для контролю стану кабельних ліній та локалізації ділянок виникнення часткових розрядів використовується сигнали глобального позиціонування. GPS. Передавання інформаційного потоку проводиться по звичайним інформаційним каналам (локальні або глобальні мережі).

В системі CDR використовують амплитудно-фазовий (частотний) аналіз розподілення імпульсів часткових розрядів відносно зміни фазової напруги (рис.3.41). На такому графіці показується розподіл часткових розрядів за амплітудою, фазовому куту напруги живлення та кількості імпульсів. Такий розподіл добре описується матрицею, в якій є строки, які розділяються за амплітудою, стовбці, які відповідають визначеним фазовим кутам напруги живлення. В кожній матриці на перетині строки та стовбцю стоїть число, яке показує кількість імпульсів часткових розрядів з такими параметрами. Використання таких матриць дозволяє використовувати відповідні математичні методи обробки даних за допомогою мікроконтролерів.

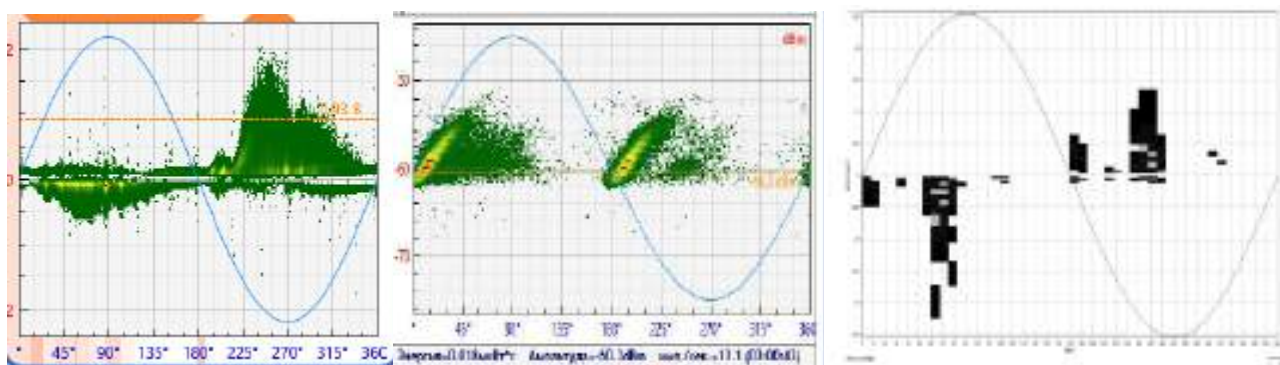


Рис.3.41 Приклади розподілення часткових розрядів за амплітудою, фазою та інтенсивністю

Важливою діагностичною інформацією є зв'язок моментів виникнення часткового розряду з фазою напруги джерела живлення, під впливом якого виникає частковий розряд

Цей зв'язок характеризується наступними признаками:

- На якій півхвилі напруги живлення виникає часткових розряд (позитивній чи негативній);
- Частковий розряд виникає при якій часовій (кутовій) ділянці напруги живлення (при зростанні, при зменшенні або такий зв'язок відсутній);
- При підвищенні напруги живлення амплітуда часткових розрядів зростає, зменшується або такий зв'язок в загальні відсутній;
- Яка частота повторення імпульсів – вони виникають на кожному періоді напруги живлення однократно чи багатократно, або через декілька періодів напруги живлення.

Слід відзначити, що дефект ізоляції типу «водяне древо» (тріщина, яка заповнена водою) визначити за допомогою часткових розрядів практично не можливо, оскільки він не модифікує ізоляційний проміжок, а тільки скорочує його. В наступний час не існують надійних методів визначення таких дефектів ізоляції.

3.7.8. Тепловізійне обстеження високовольтного електрообладнання

Тепловізійне обстеження засновано на реєстрації інфрачервоного випромінювання від розігрітих елементів високовольтного обладнання. Спектр інфрачервоного випромінювання складає від 0,74 мкм (ближній діапазон) до 1-4 мкм (середній діапазон) та 7-14 мкм (дальній діапазон). У дальньому діапазоні інтенсивність випромінювання залежить від температури досліджуваного об'єкту. Це дозволяє виявити:

- місця ненадійного контакту електричних з'єднань;
- порушення циркуляції масла в трансформаторах та високовольтних вводах;
- порушення в роботі контактних апаратів (автоматичних вимикачів, контакторів, роз'єднувачів);

- виникнення часткових розрядів на поверхні та в об'ємі ізоляції;
- порушення систем вентиляції в комплектному розподільному обладнанні.

Тепловізійне обстеження високовольтного електрообладнання виконують за допомогою тепловізорів та пірометрів.

Тепловізор (thermovision) - уявляє собою систему отримання, формування та обробки термозображень в реальному масштабі. Вони призначенні для вимірювання температури та аналізу статичних картин теплового стану об'єкту (рис.3.42)

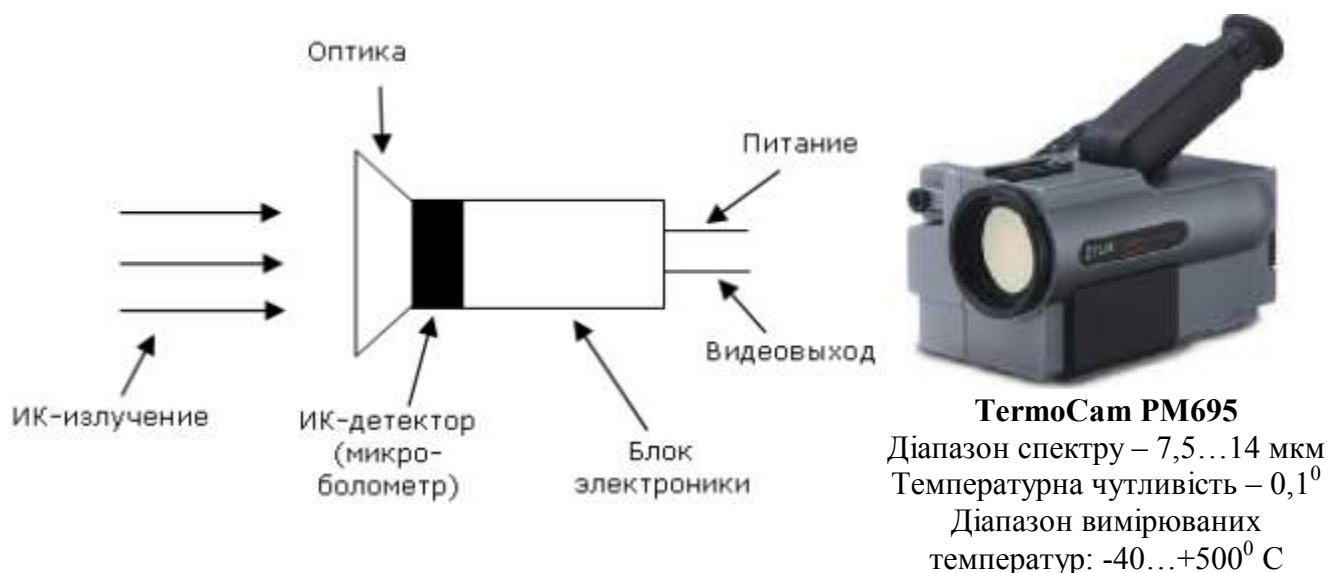


Рис.3.42 Структурна схема та зовнішній вигляд тепловізору

Пірометр (thermopoint) – це інфрачервоний пристрій призначений для дистанційного вимірювання температури в деякій точці об'єкту. Пірометри в наступний час поширено використовуються для контролю температури електричних пристроїв в розподільному комплексному обладнанні.

Аналіз картини тепловізійного обстеження об'єкту дозволяє виявити:

- місця ненадійного електричного контакту при з'єднанні дротів та кабелів (рис.3.43 а);
- порушення циркуляції масла в високовольтних трансформаторах (рис.3.43 б);
- обгорання силових контактів в автоматичних вимикачах (рис.3.43 в);
- наявність ненадійних з'єднань батарей високовольтних конденсаторів (рис.3.43 г);
- наявність дефектів ізоляції кабелів та високовольтних вводів (рис.3.43 д).

Тепловізійне обстеження об'єкту дозволяє своєчасно виконувати профілактичні роботи по усуненню виявлених недоліків ізоляції.

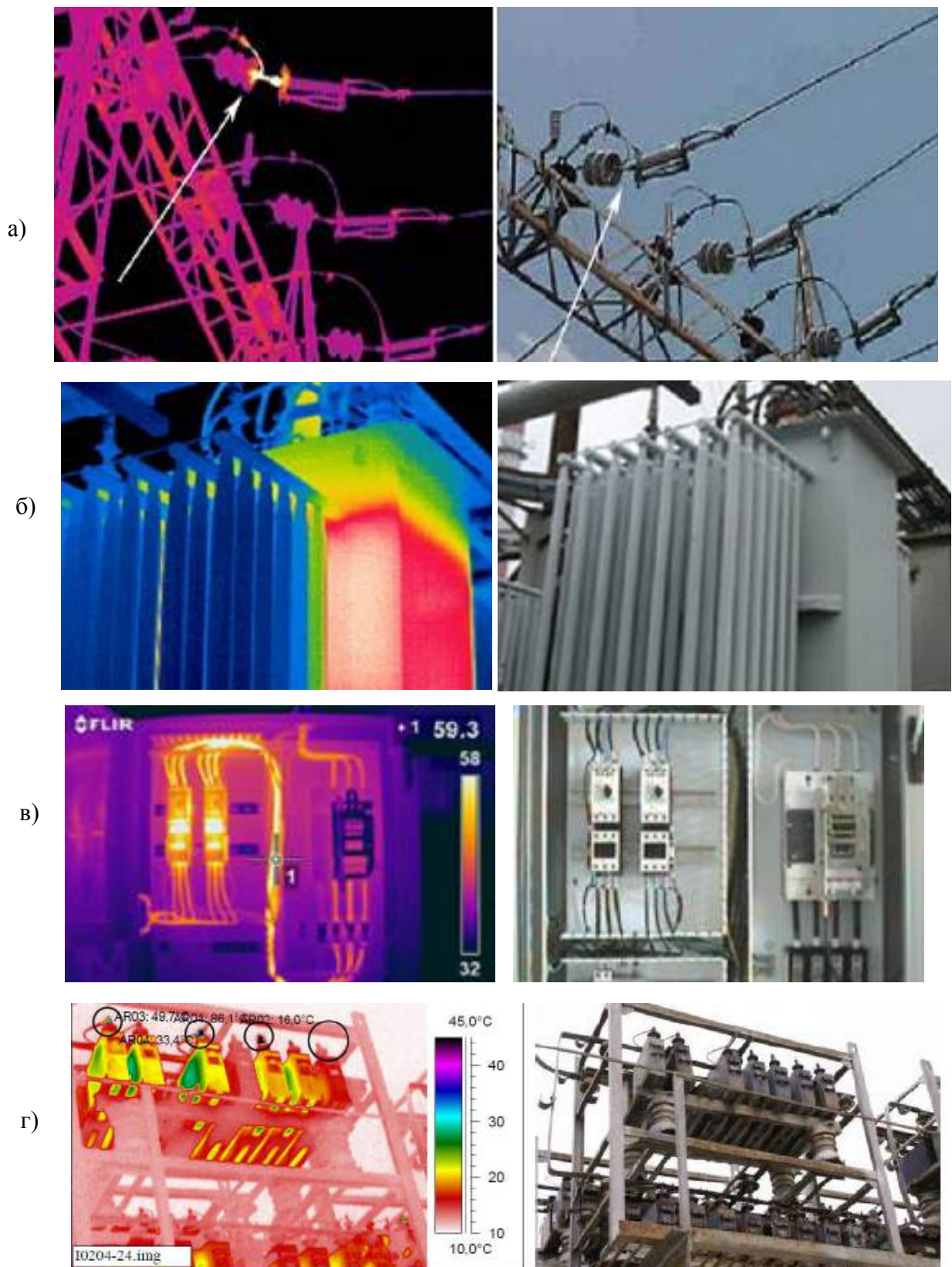


Рис.3.43 Дослідження високовольтного обладнання за допомогою тепловізора

Контрольні питання до розділу 3

1. Класифікація високовольтних ізоляторів.
2. Основні типи та конструкції стаціонарно-апаратних високовольтних ізоляторів
3. Основні типи та конструкції високовольтних ізолюючих вводів.
4. Класифікація та основні типи високовольтних кабелів.
5. Високовольтні кабелі з паперовою ізоляцією та в'язким просоченням
6. Маслозаповнені високовольтні кабелі.
7. Високовольтні кабелі з монолітною полімерною (пластмасовою) ізоляцією
8. Конструкція високовольтного кабелю з XLPE – ізоляцією.
9. Конструкція високовольтного кабелю з гумовою ізоляцією
10. Основні вимоги та методи випробування високовольтної ізоляції кабелів.
11. Особливості ізоляції високовольтних конденсаторів
12. Особливості ізоляції високовольтних трансформаторів
13. Особливості високовольтної ізоляції електричних машин
14. Природа старіння високовольтної ізоляції
15. Основні задачі та методи профілактики високовольтної ізоляції.
16. Контроль високовольтної ізоляції методом вимірювання опору.
17. Контроль високовольтної ізоляції методом вимірювання ємності.
18. Контроль високовольтної ізоляції за тангенсом кута діелектричних втрат
19. Контроль високовольтної ізоляції за інтенсивністю часткових розрядів
20. Контроль високовольтної ізоляції підвищеною напругою
21. Моніторинг стану високовольтної ізоляції

4. ПЕРЕНАПРУГИ ТА ЗАХИСТ ВІД НИХ

Перенапряга – це будь яке підвищення напруги в електричній мережі вище максимальної робочої напруги $U_{P_{\max}} = U_H + (0,05 \dots 0,2) \cdot U_H$. Перенапруги, які виникають в електричних системах є одним з факторів, які суттєво впливають на надійність електрообладнання. При перенапругах виникають тяжкі умови для роботи ізоляції, оскільки не дивлячись на їх короткочасність, перенапруги можуть багатократно перевищувати $U_{P_{\max}}$, що може пошкодити ізоляцію та вивести електрообладнання з ладу.

4.1. Класифікація та характеристики перенапруг

Класифікація видів перенапруг наведена на рис.4.1. Усі перенапруги підрозділяються на зовнішні (джерело яких знаходиться зовні електрообладнання чи мережі) та внутрішні (джерело яких виникає в наслідок енергії підключених до електричної мережі генераторів та індуктивних елементів) в залежності від джерела генерування перенапруги. Основним джерелом генерування зовнішніх перенапруг є блискавка. Основним джерелом



Рис.4.1 Класифікація перенапруг

внутрішніх перенапруг є комутаційні перенапруги та перенапруги внаслідок аварій (короткого замикання).

В залежності від міста прикладення перенапруги виділяють міжфазні, внутріфазні та міжконтактні перенапруги.

Фазні перенапруги практично найбільш важливі. Вони діють на ізоляцію, струмопровідні частини електрообладнання від землі чи заземлених конструкцій. До цих частин нормально прикладена фазна напруга. Але в мережах з ізолюваною нейтралю слід урахувувати, що процесі пошуку місця замикання на землю к фазної ізоляції може бути прикладена лінійна напруга.

Міжфазні напруги ураховують при виборі міжфазної ізоляції, відстані між фазними дротами, відстані між обмотками з різною фазною напругою трансформаторів, електричних машин та ін.

Внутріфазні перенапруги виникають між струмопровідними елементами однієї фази, наприклад між вітками обмоток трансформаторів, електричних машин та ін., а також між нейтралю та землею.

Перенапруги між контактами різних перемикачів виникають при вимиканні частини електрообладнання електричної мережі чи при несинхронній роботі окремих ділянок електричної мережі.

Основними характеристиками перенапруг є кратність, повторювання перенапруг, форма кривої перенапруги та широта охопата електричної мережі.

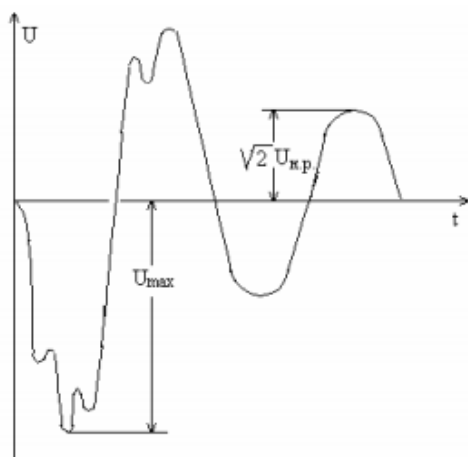


Рис.4.2 Осцилограма перенапруг

1. **Кратність** — це відношення максимального значення напруги U_{MAX} до амплітуди найбільшої робочої напруги на даній ізоляційній конструкції $\sqrt{2} \cdot U_{P\max}$ (рис.4.2):

$$K = \frac{U_{MAX}}{\sqrt{2} \cdot U_{P\max}} \quad (4.1)$$

Дуже часто при визначенні кратності перенапруг використовують не $\sqrt{2} \cdot U_{P\max}$, а фактичній амплітуді напруги, яка має місце посередньо перед появою перенапруги.

Це допустимо оскільки значення U_{MAX} пропорційно робочій напрузі.

2. **Повторювання перенапруг** — визначається очікуваної кількістю виникнення перенапруг за даний проміжок часу, наприклад за рік.
3. **Форма кривої перенапруги** — обумовлюється довжиною фронту, тривалістю, кількістю імпульсів і часом існування даної перенапруги, і може бути аперіодичною, коливальною, високочастотною та ін.
4. **Широта охопата електричної мережі** — це кількість ізоляційних конструкцій, на які одночасно впливає дана перенапруга.

Усі перелічені характеристики як правило випадкові та носять статистичний характер.

4.2 Зовнішні перенапруги

Основним джерелом зовнішніх перенапруг в високовольтних мережах є грозові розряди (блискавка). Повна класифікація зовнішніх перенапруг наведена на рис.4.3.

Найбільш небезпечні прямі удари блискавки в струмопровідні частини електрообладнання, оскільки струм блискавки може досягати 100 кА, а напруга в точці удару блискавки може досягати десятки мегавольт. Тому необхідне забезпечити захист електрообладнання від прямих ударів блискавки, що досягається використанням стержневими і тросовими блискавковідводами.



Рис.4.3 Класифікація зовнішніх перенапруг

Блискавковідвід – це споруда, вища за захисний об’єкт, яка сприймає прямі удари блискавки і відводить струми блискавки в землю через системи заземлень. Кожен блискавковідвід складається з трьох основних елементів: блискавкоприймача, струмопровода, заземлення.

Удар блискавки в заземленні елементи електрообладнання призводить до виникнення в них короточасних перенапруг, які можуть викликати зворотні перебиття з заземлених елементів на струмопровідні. Для захисту від такого зворотного перебиття необхідне забезпечити малий опір заземлення електричного обладнання та блискавковідводів.

Індуковані перенапруги – це результат взаємного магнітного (індуктивна складова) та електричного (ємнісна складова) зв’язку каналу блискавки зі струмопровідними та заземленими елементами електричного обладнання чи мережі. Індуковані перенапруги найбільш небезпечні для ізоляції мереж з низькими чи середніми напругами.

Імпульси перенапруг можуть впливати на ізоляцію електрообладнання, яке розташоване на значній відстані від удару блискавки, оскільки вони розповсюджуються на значні відстані з малим затуханням. Такі перенапруги звуть набігаючи ми хвилями. Вони можуть перерозподілятися по обмоткам електричних машин та трансформаторів, впливаючи на їх ізоляцію.

4.3 Внутрішні перенапруги

Найбільш різноманітні внутрішні перенапруги, оскільки вони обумовлені коливаннями енергії, яка накопичується в елементах електрообладнання (відключення ділянки електричної мережі, трансформатора, електричної машини, обриви фаз, пробій ізоляторів та ін.) чи при зміні енергії, яка поступає від джерел енергії (генератори при зміні режиму роботи).

Внутрішні перенапруги підрозділяються на стаціонарні, квазістаціонарні та комутаційні. Умовно розвиток перенапруги наведений на рис.4.4. і він має три стадії:

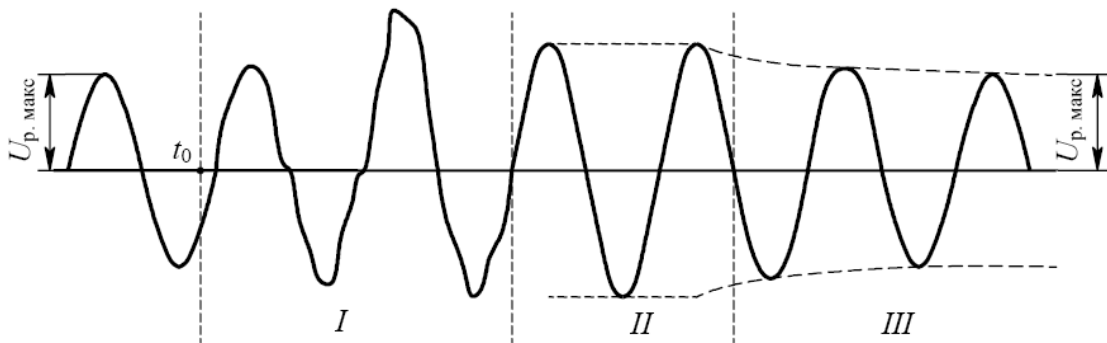


Рис.4.4 Вигляд зміни напруги в мережі при появі внутрішніх перенапруг:
 t_0 – момент комутації

1. стадія – перехідний процес (комутаційні перенапруги). Його тривалість – декілька періодів.
2. стадія – умовно стала стадія (квазістаціонарний стан). Перехідний процес закінчився, але параметри електричного ланцюга інші, тому встановилася більш висока напруга, а регулятори на генераторах ще не спрацювали.
3. стадія – робота регуляторів напруги у генераторах, при цьому напруга понижується до нових значень робочої напруги.

Обмеження перенапруг на першій та другій стадії виконується різноманітними захисними розрядниками, трубчатими розрядниками, вентильними розрядниками, нелінійними обмежувачами перенапруг чи схемними рішеннями.

Стаціонарними перенапругами називають довготривале підвищення напруги, яке перевищує найбільші фазні напруги мережі. Вони можуть бути в різних режимах роботи електрообладнання і підтримуватися, якщо це необхідно для забезпечення необхідних рівнів напруги в інших ділянках електричної мережі при максимальному чи мінімальному навантаженні.

Квазістаціонарні перенапруги виникають при несприятливому сполученні параметрів мережі та тривають доки таке сполучення існує. Дійсно їх тривалість обмежується часом дії релейного захисту чи оперативним персоналом. Найчастіше вони виникають в несиметричних режимах: при однофазному чи двохфазному замиканні на землю, розброду дії чи відказу вимикача.

Квазістаціонарні перенапруги розділяються на режимні, резонансні та ферорезонансні (рис.4.5).

Режимні перенапруги мають місце при несприятливому сполученні електрорухомих сил, які діють у мережі. Наприклад, це перенапруги, які діють на протязі часу замикання на землю в мережі з ізольованою нейтраллю, а також перенапруги при збудженні та розгоні генератора, що виникає при раптовому скиданні навантаження, що пов'язане з зменшенням напруги на лінії та



Рис.4.5 Класифікація квазістаціонарних перенапруг

інерційності регуляторів збудження генераторів. Режимні напруги мають місце при несиметричних коротких замиканнях на землю.

Резонансні перенапруги мають місце при приближенні одної з частот власних коливань окремих ділянок мережі до частоти вимушеної е.р.с., наприклад при підключенні трансформатора, коли резонансний контур може виникнути за рахунок ємності між фазами та індуктивністю трансформатора.

Феррорезонансні перенапруги можуть виникнути в контурах, які мають ємність та індуктивність з насиченим магнітопроводом. (трансформатор, електрична машина, реактор), на частоті 50 Гц, на вищих та нижчих гармоніках. В несиметричній схемі (обрив дроту) ферорезонанс на промислової частоті може виникнути в контурі з послідовно з'єднаних трансформатора з насиченим осердям та ємності дротів.

4.4. Комутаційні перенапруги

Електричні мережі високої напруги містять сконцентровані та розподілені ємності та індуктивності, тому мають коливальні властивості, завдяки запасеній електричній та магнітній енергії. Причина виникнення коливань полягає в плановій або аварійній комутації електричних мереж.

Найбільш розповсюдженими випадками комутацій є відключення ненавантажених ліній, відключення ліній при асинхронному ході генератора,

автоматичне повторне включення та ряд інших. Кожна комутація призводить до виникнення перехідних процесів, які супроводжуються виникненням перенапружень. Можливі перенапруження і при нестійкому горінні дуги при однофазному короткому замиканні в мережі з ізольованою нейтралю.

Комутаційні перенапруги поділяються на:

- фазні, що діють на ізоляцію відносно землі;
- міжфазні, що діють на ізоляцію різних фаз;
- між контактні, що виникають на різних сторонах контакту.

Природа виникнення комутаційних перенапруг наступна:

- перенапруги при відключенні конденсаторів і ненавантажених ліній електропередач;
 - перенапруги при відключенні ненавантажених трансформаторів;
 - перенапруги при неповнофазних режимах;
 - перенапруги при почергових замиканнях на землю (нестійка дуга);
 - перенапруги ферорезонансні;
 - перенапруги при відключенні великих струмів (після короткого замикання);
 - перенапруги при автоматичному повторному включення.
- Розглянемо деякі з цих типів перенапруг більш детально.

4.4.1. Перенапруги при відключенні конденсаторів і ненавантажених високовольтних ліній

Відключення ненавантаженої (розімкнутої на одному кінці) високовольтної лінії може привести до значних перенапруг. При проходженні крізь нуль струму лінії відновлюється діелектрична міцність між контактами вимикача, які розбігаються. Якщо напруга, яка відновлюється між цими контактами перевищує електричну міцність, то виникне повторне загоряння дуги, і ємність лінії буде перезаряджатися в коливальному процесі. Одна комутація відключення при повільному розходженні контактів вимикача чи роз'єднувача може супроводжуватися декілька ми повторними загоряннями дуги, і відповідно імпульсами перенапруги на ізоляції.

Розглянемо механізм розвитку цих перенапруг у простій еквівалентній схемі, де ланцюг живлення замінений на е.р.с., яка включена послідовно з індуктивно-активним внутрішнім опором, а лінія – розподіленою ємністю (рис.4.6 а). При холостому ході лінії струм випереджає напругу практично на 90° , оскільки лінія – це ємність. При відключенні лінії, коли контакти вимикача починають розходитися між ними виникає дуга. При проходженні струму крізь 0 (момент t_0), дуга між контактами загасає. Лінія залишається зарядженою. На ній залишається напруга $+U_\phi$, а напруга джерела струму продовжує змінюватися по синусоїді. Через півперіоду напруга джерела струму досягає напруги $-U_\phi$, тобто між контактами вимикача напруга досягне значення $2U_\phi$. Міцність проміжку між контактами за півперіоду зростає не більш ніж до $2U_\phi$ (для повітряних вимикачів) чи до U_ϕ (масляні вимикачі).

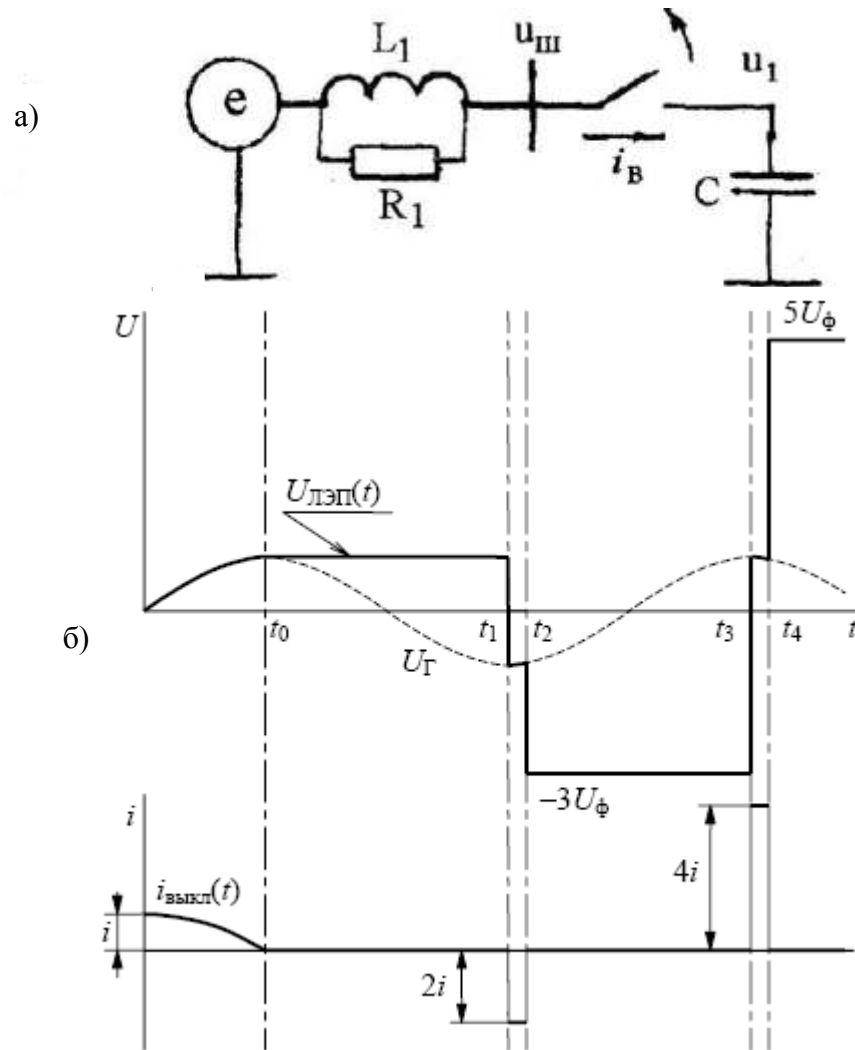


Рис.4.6 Відключення ненавантаженої високовольтної лінії при наявності повторного загоряння дуги

Існує значна вірогідність того, що в цей момент виникне повторне загоряння дуги (момент часу t_1), коли напруга джерела струму буде дорівнювати U_{ϕ} . При цьому лінія буде передзаряджатися від $+U_{\phi}$ до $-U_{\phi}$, а по ній буде розповсюджуватися хвиля напруження $-2U_{\phi}$ та протікати струм $i = -\frac{2U_{\phi}}{Z}$. Перезарядження високовольтної лінії виникає внаслідок розповсюдження по лінії хвилі з крутим фронтом $-2U_{\phi}$. На кінці розімкнутої лінії хвиля $-2U_{\phi}$ відіб'ється з тим же знаком, тобто напруга досягне $-4U_{\phi}$, але результуюча напруга стане $-4U_{\phi} + U_{\phi} = -3U_{\phi}$. Хвиля струму теж відіб'ється з протилежним знаком (рис.4.7). Частота таких вільних коливань звичайно на порядок вища промислової частоти. При цьому на лінії встановиться напруга $-3U_{\phi}$, а сумарний струм де пройшла відбита хвиля стане рівним 0 . Тому коли відбита хвиля дійде до контактів вимикача струм у ньому пройде крізь 0 і дуга погасне (момент часу t_2). Цей час пробігу хвилі струму та напруги значно менш півперіоду промислової частоти. Але напруга джерела продовжує змінюється

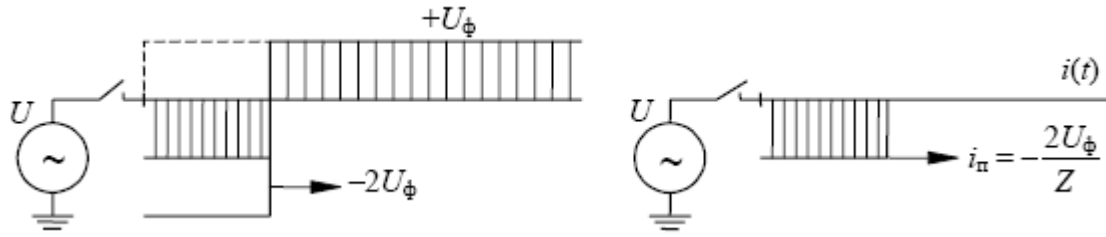


Рис.4.7 Хвильові процеси при відключенні ненавантаженої високовольтної лінії

згідно синусоїдальному закону до $+U_\phi$, а між контактами вимикача напруга досягне $+4U_\phi$, що знову може викликати повторне загоряння дуги і т.д. Найбільш небезпечно загоряння дуги в момент t_3 . У цьому випадку напруга може досягнути $5U_\phi$.

Як щоб повторне загоряння дуги продовжувалося без кінцеве, то перенапруга у лінії досягла би дуже великих значень. Таким чином, повторні загоряння дуги в найбільш несприятливих моментів часу можуть викликати багатократні небезпечні для ізоляції перенапруги. В реальних вимикачах

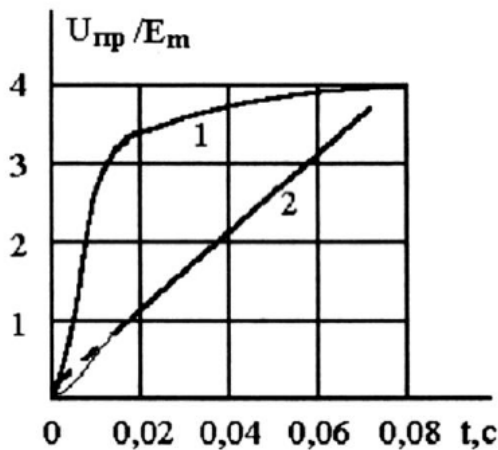


Рис.4.8 Зміна у часі електричної міцності між контактним проміжком:

- 1 – повітряний вимикач;
- 2 – масляний вимикач

загоряння дуги виникає у будь який випадковий час, тому перенапруги декілька менш. Реально в деяких типах масляних вимикачах загоряння дуги повторюється 12...15 разів, що дуже небезпечно для ізоляції при наступному автоматичному включенні високовольтної лінії.

В сучасних вимикачах приймаються заходи до перешкоджання повторних загорянь дуги при відключенні ліній. Так повітряні вимикачі високої напруги практично завжди відключають лінію без повторного загоряння дуги. Масляні вимикачі мають меншу швидкість розходження контактів на та відтворення електричної міцності, тому в них виникають

повторні загоряння дуги (рис.4.8).

Для обмеження подібних перенапруг використовують наступне:

1. Підвищення швидкості відтворення електричної міцності, тобто швидкості розходження контактів. Це дуже радикальний засіб. Але при підвищенні швидкодії вимикачів значно ростуть перенапруги при відключенні ненавантажених трансформаторів.
2. Використання вимикачів з шунтуючими резисторами. Недолік – складність конструкції та значна вартість.
3. Використання вентильних розрядників, що дозволяє ефективно обмежувати перенапруги в лініях до 200 м.
4. Приєднання до лінії автоматичних трансформаторів напруги.

5. Використання нелінійних обмежувачів перенапруг, однак за рахунок багатократного загоряння дуги строк служби їх обмежується.

Подібні процеси виникають і при відключенні батарей конденсаторів поперечної компенсації.

4.4.2. Перенапруги при відключенні ліній з коротким замиканням

Комутаційні перенапруження на лініях можуть виникати при відключеннях коротких замикань в мережах з незаземленою нейтрапю.. Аналіз цих процесів можна провести методом накладення, розглядаючи напругу на лінії як суму стаціонарного режиму короткого замикання і перехідного процесу включення в точці короткого замикання еквівалентного генератора струму, рівного за величиною і спрямованого назустріч струму короткого замикання. Найбільш інтенсивний перехідний процес виникає на пошкодженій фазі, де різниця між початковим (до відключення лінії) і сталим значенням напруги лінії після відключення має найбільшу величину (рис. 4.9).

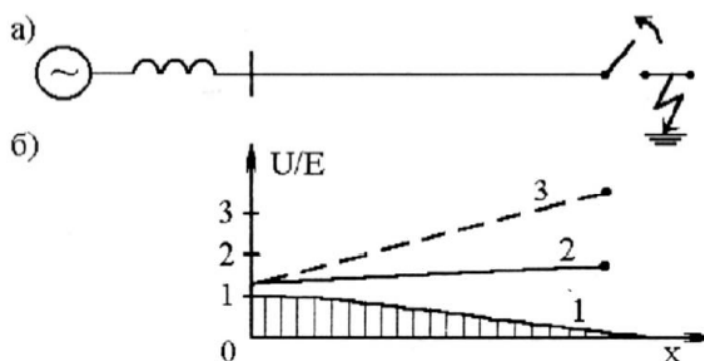


Рис.4.9 Еквівалентна схема відключення лінії при короткому замиканні (а) та розподіл напруг вздовж лінії (б):
1 – початкова перенапруга; 2 – стала перенапруга; 3 – амплітудна перенапруга

Наближену оцінку амплітуди перенапруження можна визначити по формулі:

$$U_{\max} = U_H + (U_{уст} + U_H) \cdot k_{уд} \quad (4.2)$$

де $U_{уст}$ - перенапруга в сталому режимі (після закорочення)

U_H - початкова перенапруга на лінії

$k_{уд} = 1 + \exp\left(\frac{\delta\tau}{\omega}\right)$ - ударний коефіцієнт, який при малому значенні опору лінії

R приблизно дорівнює 2;

$\delta = \frac{R}{2L}$ - стала часу коливального процесу

При цьому слід врахувати, що відключення струму короткого замикання відбувається зазвичай поблизу максимуму синусоїди живлячої е.р.с., коли індуктивний струм короткого замикання переходить через нульове значення.

Амплітуда сталого режиму уст $U_{уст}$ на кінці розімкненої лінії, як відзначалося раніше, в звичайних схемах не перевершує 1,3 амплітуд номінальної фазної напруги. Тому можливі максимальні кратності перенапруження, як слідує з (4.2) не перевершує $U_{max} = 0 + (1,3 + 0) \cdot 2 = 2,6$ на пошкодженій фазі, якщо коротке замикання сталося безпосередньо поблизу вимикача, що відключає лінію. Якщо вимикач розташований на віддалі від місця замикання, перенапруження, як правило, виявляються менше.

4.4.3 Перенапруги при відключенні ненавантажених трансформаторів

При протіканні струму по обмоткам трансформатора, генераторів, електричних машин та іншого електричного обладнання, де використовується магнітне поля, накопичується запас енергії:

$$W_M = \int_0^{\Psi_M} i \cdot d(\psi_M) \quad (4.3)$$

де Ψ_M – потокозціплення обмотки.

Розрив контуру, який має індуктивність, при значеннях струму відмінного від 0, повинен супроводжуватися перетворенням цієї енергії в інші види, і перш за все в енергію електричного поля. Цим пояснюється виникнення перенапруг на індуктивних елементах при їх відключенні.

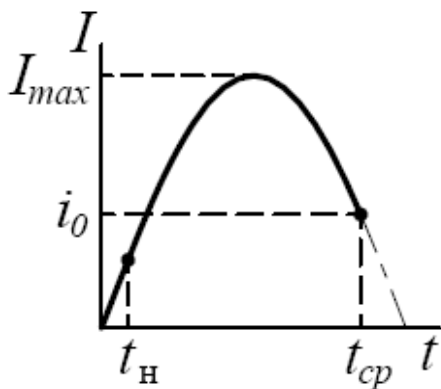


Рис.4.10 Виникнення струму зрізу i_0 у вимикачі при відключенні до переходу напруги через нуль

Сучасні вимикачі здатні переривати робочі струми і струми короткого замикання тільки поблизу моменту переходу кривої струму через нульове значення. При цьому випадку накопичена в індуктивності енергія дорівнює нулю і перенапруги не виникають. Проте при відключенні малих індуктивних струмів з амплітудою в десятки ампер і менш в контурах з малими активними втратами можуть створюватися умови для обриву струму у вимикачі до його природного переходу через нуль, що може привести до виникнення суттєвих перенапруг. Явище

обриву струму отримало назву зрізу струму, а струм i_0 називають струмом зрізу (рис.4.10). Процес виникнення перенапруг у цьому випадку можна розглянути на еквівалентній схемі, наведеній на рис. 4.11..

Ємність C на ній заміщає вхідну ємність трансформатора і сумарну ємність на землю дротів та ошиновки від трансформатора до вимикача. Індуктивність L в цій схемі модулює індуктивність ненавантаженого трансформатора (індуктивність намагнічування).

Нехай контакти вимикача почали розходитися у момент часу t_n , (рис. 4.10), між контактами спалахує дуга, у вимикачі починається активний процес дугогасіння і у момент t_0 відбувається зріз струму при струмі i_0 .

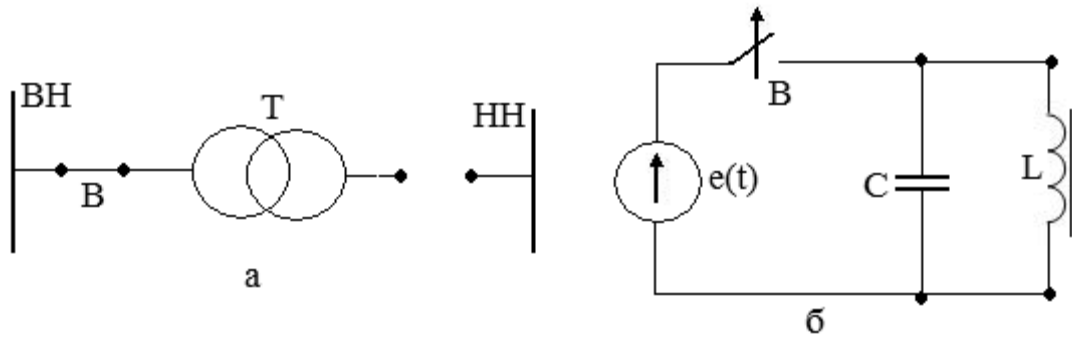


Рис.4.11 Принципова (а) та еквівалентна схема (б) при відключенні ненавантаженого трансформатора:

Т – трансформатор; В – вимикач; ВН, НН – шини високої та низької напруги, відповідно; $e(t)$ – е.р.с джерела живлення; C – вхідна ємність трансформатора; L – індуктивність намагнічування трансформатора

Напруга на ємності C в цю мить дорівнює U_0 . У коливальному контурі залишається енергія, яка накопичена в індуктивності $L \cdot \frac{i_0^2}{2}$ і в ємності $C \cdot \frac{U_0^2}{2}$. В контурі $L-C$ виникнуть коливання з максимальною амплітудою напруги на ємності, яка визначається з рівняння балансу енергії, :

$$\frac{CU_m^2}{2} = \frac{CU_0^2}{2} + \frac{L}{2}i_0^2$$

Звідси:

$$U_m = \sqrt{U_0^2 + \frac{L}{C}i_0^2} \approx Z_T \cdot i_0 \quad (4.4)$$

де $Z_T = \sqrt{\frac{L}{C}}$

Напруга, яка визначається по (4.4), може досягати великих значень. Реальна ж напруга обмежена пробоем міжконтактного проміжку. Процес повторних пробоев у вимикачі представлений на рис. 4.12. Після першого зрізу струму напруга на ємності C починає зростати згідно із законом:

$$U_C(t) = U_0 \cos \omega_0 t + i_0 \sqrt{\frac{L}{C}} \sin \omega_0 t$$

де $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – власна частота коливань контуру.

На рис. 4.12 показаний процес відновлення електричної міцності міжконтактного проміжку вимикача, якби дуга згасла у момент часу t_n . Коли відбувається зріз струму (t_0 і далі), то внаслідок інтенсивного розпаду дуги міцність проміжку швидко зростає до значень кривої $U_{эл пр}(t)$.

Повторний пробій настане, коли напруга на контактах вимикача $\Delta u(t)$ перетнеться з кривою $U_{эл пр}(t)$. У зв'язку з тим, що $\Delta u(t) = U_C(t) - e(t)$, то момент пробоем можна визначити як точку перетину перенапружень на ємності з кривою $U_{эл пр}(t) + e(t)$. Після повторного пробоем напруга на ємності стає рівною е.р.с, і

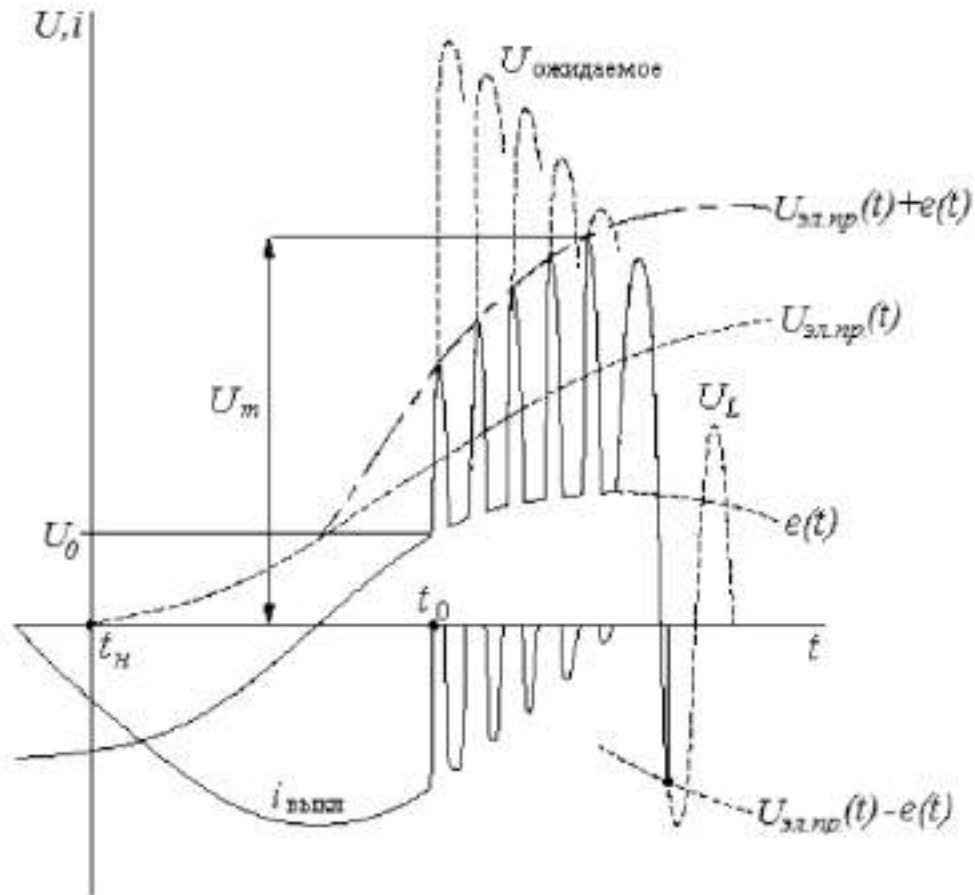


Рис.4.12 Процес повторного загоряння дуги у вимикачі при відключенні навантажень індуктивного характеру

в колі знову з'являється струм, у вимикачі знову починається процес дугогасіння і відбувається новий зріз струму, але вже при меншому значенні, чим i_0 . Внаслідок цього і очікувана напруга виявляється менше. Але якщо ця напруга досить велика, то знову повториться повторний пробій у вимикачі і так триватиме до тих пір, доки максимальна напруга між контактами вимикача не зробиться менше міцності міжконтактного проміжку вимикача, що відновлюється.

У експериментах по відключенню трансформаторів 110-220 кВ спостерігалися перенапруження до $4,3U_{\Phi m}$ ($U_{\Phi m}$ - максимальна фазна напруга) і до $2,75U_{\Phi m}$ для трансформаторів 380...410 кВ. Оскільки енергія, що запасасться в коливальному контурі, відносно невелика, то захист від цих перенапружень може здійснюватися за допомогою звичайних грозозахисних вентильних розрядників або нелінійних обмежувачів перенапруження.

Максимальні кратності перенапружень при відключенні ненавантажених трансформаторів в мережах різних класів напруги приведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 Максимальні кратності перенапружень при відключенні ненавантажених трансформаторів

$U_{ном}$, кВ	6-10	110	150	220	330	500
$k_{нтр}$	4,3...6,2	4,1...4,5	2,9...3,5	1,9...2,1	1,9...2,1	1,8...2,1

Перенапруження при відключеннях електродвигунів мають таку ж природу, як і при відключеннях трансформаторів. Ці перенапруження викликані обривом струму у вимикачі і обумовлені вільними коливаннями, що виникають в процесі обміну енергією між індуктивністю електродвигуна, який відключається, і ємністю живлячого кабелю. Вони можуть зростати при відключенні синхронного електродвигуна в режимі асинхронного ходу, а також при двофазних коротких замиканнях в обмотці статора машини.

У аварійних режимах роботи електродвигуна збільшується ковзання ротора і зростає струм в обмотці статора, що також призводить до підвищення перенапружень. Як показують спеціальні виміри, максимальна кратність перенапружень складає 3.5...7.0 - при загальмованому роторі і 3.0...3.5 - при подвійних замиканнях на землю.

Перенапруження, що виникають при відключеннях електродвигунів, як правило, є комбінацією коливальних процесів різної частоти, накладених на напругу робочої частоти 50 Гц. Перенапруження, які виникають при зрізі струму до його природного переходу через нуль, є високочастотними коливаннями.

Автоматична реєстрація перенапружень в діючих мережах 6...10 кВ показують, що максимальні кратності перенапружень за відсутності заходів для їх обмеження складають:

$k_{nmax}=4,2$ -при нормальних оперативних включеннях електродвигунів;

$k_{nmax} = 5,2$ - при включенні двигуна в мережу з однофазним замиканням на землю;

$k_{n max} = 7,2$ - при включенні в циклі автоматичного повторного включення

Такі високі кратності перенапружень представляють небезпеку для ізоляції електродвигунів і тому вимагають застосування спеціальних заходів по їх зниженню.

4.5. Апарати для захисту від перенапруг

4.5.1. Захисні проміжки (розрядники)

Захисні проміжки призначені для запобігання появі небезпечних для ізоляції електроустановок імпульсів перенапруги, не заважаючи їх роботі при номінальній напрузі. Спрацьовування таких розрядників викликає різкий спад напруги, яка виникає в наслідок перехідних процесів і небезпечних перенапружень на подовжній ізоляції високовольтних пристроїв (трансформатори, генератори, реактори і т. п.)

Найпростіший захисний проміжок - іскровий проміжок, який включений паралельно ізоляційній конструкції (рис.4.13 а).

При набіганні імпульсу перенапруги відбувається пробій захисного проміжку з різким падінням амплітуди перенапруги і ізоляція залишається непошкодженою, якщо вольт-секундна характеристика іскрового проміжку лежить нижче вольт-секундної характеристики ізоляції, яку він захищає (рис.4.13 б). Після пробою захисного проміжку по його іонізованому проміжку тече супровідний струм промислової частоти. Якщо електричний пристрій

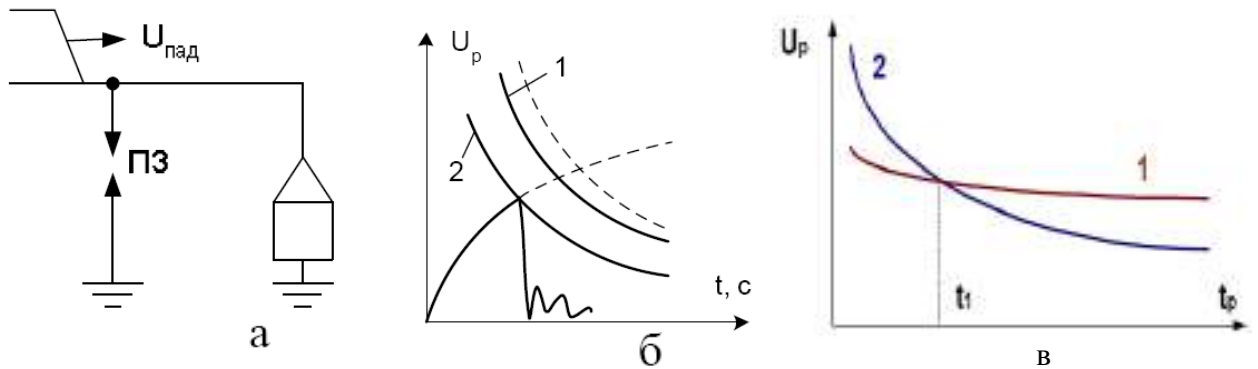


Рис.4.13 Схема включення (а) та вольт-секундні характеристики при повному захисту ізоляції(б) та відсутності захисту при малому часі дії перенапруги (в) захисного розрядного проміжку:
1 – вольт-секундні характеристики ізоляції;
2 - вольт-секундні характеристики захисного розрядного проміжку

працює в мережі із заземленою нейтраллю або пробій відбувся у 2-х чи 3-х фазах, то дуга супровідного струму переходить у коротке замикання. Тому необхідно гасити дугу супровідного струму іншими методами, що є іншою важливою функцією захисних апаратів.

Але частіш іскрові розрядники мають круту вольт-секундну характеристику, оскільки форма електричного поля в іскровому проміжку різко неоднорідне. Це не дозволяє здійснювати захист об'єктів в області коротких часів дії напруги(рис.4.13 в).

Достатньо поширено використовують рогові розрядники, які виконуються з одним чи двома іскровими проміжками. На рис.4.14 наведені приклади встановлення рогових іскрових розрядників. Здібність гасіння дуги роговим розрядником значно залежить від швидкості та напрямку вітру. Дуга гасне значно швидше при направленні вітру перпендикулярно до площі рогового розрядника.

Захисні проміжки відрізняються простотою, дешевизною і широко застосовуються в мережах низької напруги, але іскрові проміжки мають ціле рядом недоліків, основні з яких наступні :

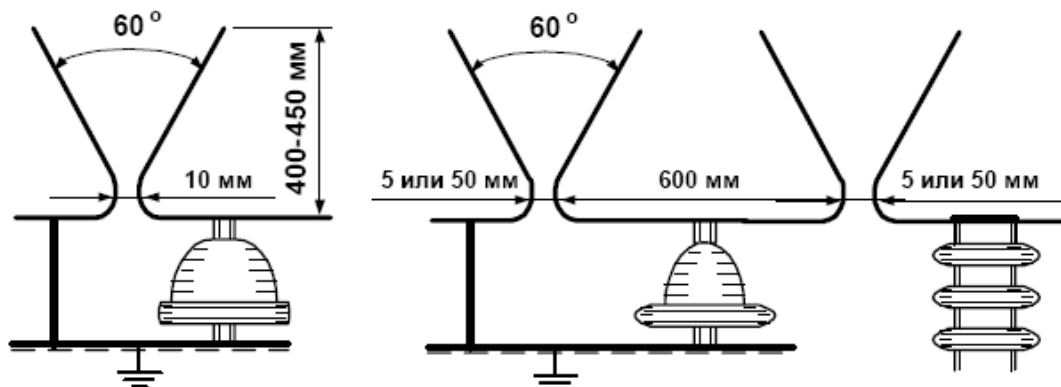


Рис.4.14 Рогові іскрові розрядники, які встановлюються на контактній мережі

- спрацьовування іскрових проміжків призводить до короткого замикання, яке повинне відключатися вимикачами; при перехідному процесі зрізу напруги можуть виникнути перенапруження на подовжній ізоляції трансформаторів, реакторів і електричних машин;
- великий статистичний розкид пробивної напруги затрудняє координацію ізоляції;
- вольт-секундна характеристика іскрового проміжку із-за різкої неоднорідності поля має підйом в області малих часів, які відповідають грозовим перенапруженням, і ізоляція, яку він захищає, може залишитися незахищеною (рис.4.13 в).

Захисні проміжки виготовляють у вигляді стрижневих електродів, розташованих у вигляді рогів, що створюють різко неоднорідне поле. Пробій захисного проміжку відбувається у нижній частині електродів, де відстань між ними мінімальна. Під дією електродинамічних сил та теплових потоків дуга піднімається вгору, розтягується і гасне завдяки зменшенню напруженості електричного поля в каналі розряду.

У мережах високої напруги захисні проміжки використовують для обмеження максимальних імпульсів перенапруги.

4.5.2. Трубочасті розрядники

Трубочасті розрядники є різновидом іскрових проміжків, доповнених пристосуванням для примусового гасіння дуги, яке виконане у вигляді трубки з газогенеруючого матеріалу (вініпласт або менш міцний фібробакеліт). Захисна функція трубчастим розрядником виконується так само, як і простим іскровим проміжком, з тими ж недоліками; відключення дуги супроводжує струм короткого замикання робиться із-за інтенсивного газовиділення трубкою при підвищеній температурі горіння дуги.

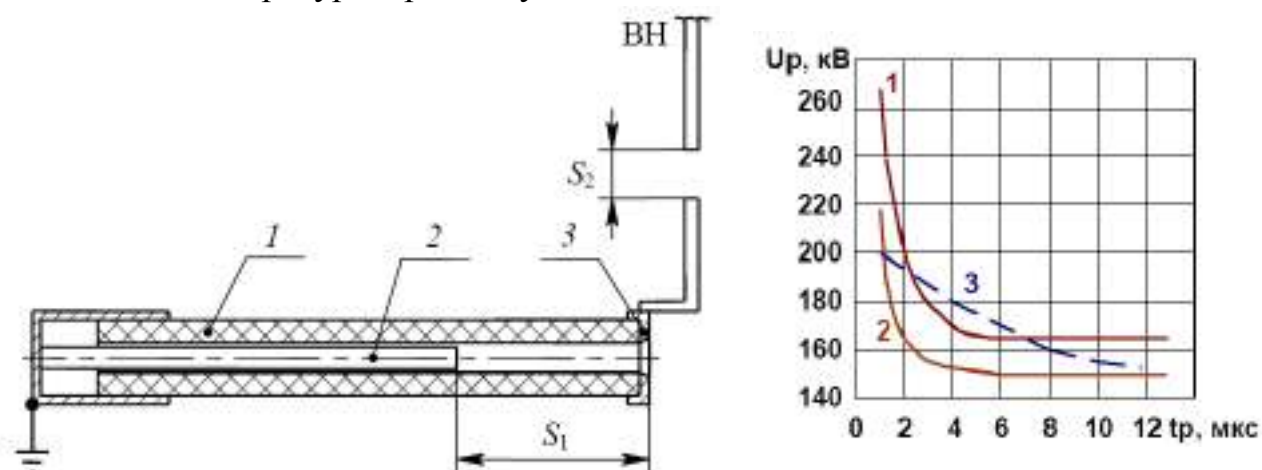


Рис.4.15 Структура (а) та вольт-секундні характеристики трубчатого розрядника РТФ-35/0.8-5 (б) при $l_2=60$ мм (1), $l_2=40$ мм (2), рогового розрядника 2х50 мм (3):

- 1- корпус з газогенеруючого матеріалу; 2- внутрішній електрод;
- 3- кільцевий електрод з отвором; l_1 - зовнішній проміжок;
- l_2 - основний розрядний проміжок

Електроди іскрового проміжку поміщаються в діелектричну трубу (1) з газогенеруючого матеріалу (наприклад, вініпласт) (рис.4.15 а). Основний проміжок S1 забезпечує дугогасіння. Проміжок S2 служить для відділення газогенеруючої трубки від мережі, щоб уникнути її розкладання від струмів витоку. При появі перенапружень пробивається S1 і S2. Через них протікає імпульсний струм і супроводжуючий струм промислової частоти. Температура підвищується, відбувається інтенсивне газовиділення з матеріалу трубки. Тиск підвищується до десятків атмосфер. Газ, який виник, виходить через відкритий електрод (3) під значним тиском. Створюється подовжнє дуття і дуга видувається назовні. Під час переходу струму через нуль дуга гасне.

Особливістю трубчатих розрядників є можливість регулювання вольт-секундної характеристики за допомогою зміни іскрового проміжку (рис. 4.15 б). Довжина зовнішнього іскрового проміжку l_2 регулюється залежно від умов захисту ізоляції, а довжина l_1 – постійна для даного типу трубчастого розрядника.

Специфічним недоліком трубчастого розрядника є наявність зони вихлопу розрядника. Крім того існує верхня межа струмів, перевищення якої може привести до руйнування розрядника.

4.5.3. Вентильні розрядники

Найбільш широкого поширення в мережах високої напруги набули вентильні розрядники, які мають пологую вольт-секундну характеристику. Вони складаються з декількох іскрових проміжків, які включені послідовно, послідовних нелінійних робочих резисторів і шунтуючих резисторів (рис.4.16 а)

Вентильні розрядники є іншим різновидом іскрових проміжків, що відрізняються слабкою неоднорідністю електричного поля і нелінійним резистором для гасіння дуги. Захисна функція вентильним розрядником виконується так само, як і простим іскровим проміжком, але у зв'язку з однорідністю електричного поля вольт-секундна характеристика розрядника істотно краща, ніж у трубчастого, і менш статистичний розкид пробивної напруги (рис.4.16 б). Відключення виниклого короткого замикання робиться за допомогою нелінійного резистора, включеного послідовно з іскровим проміжком; опір цього резистора великий при робочій напрузі і різко знижується при підвищеній напрузі.

Простий одиничний проміжок вентильного розрядника складається з двох латунними електродів, які розділені міканітними шайбами. Усі розрядні проміжки 5 з'єднуються послідовно, а також послідовно з нелінійними резисторами 6., які виготовлені з полікристалічного карбїду кремнію, і який має нелінійну вольт-амперну характеристику. Одиничні проміжки включаються послідовно один з одним для поліпшення гасіння дуги, яка нестабільна в невеликому проміжку з холодними електродами. У багатократно іскрового проміжку, проте, відбувається нерівномірний розподіл напруги на окремих проміжках, аналогічно гірлянді ізоляторів, що призводить до зниження пробивної напруги при малих часах близько 2-4 мкс

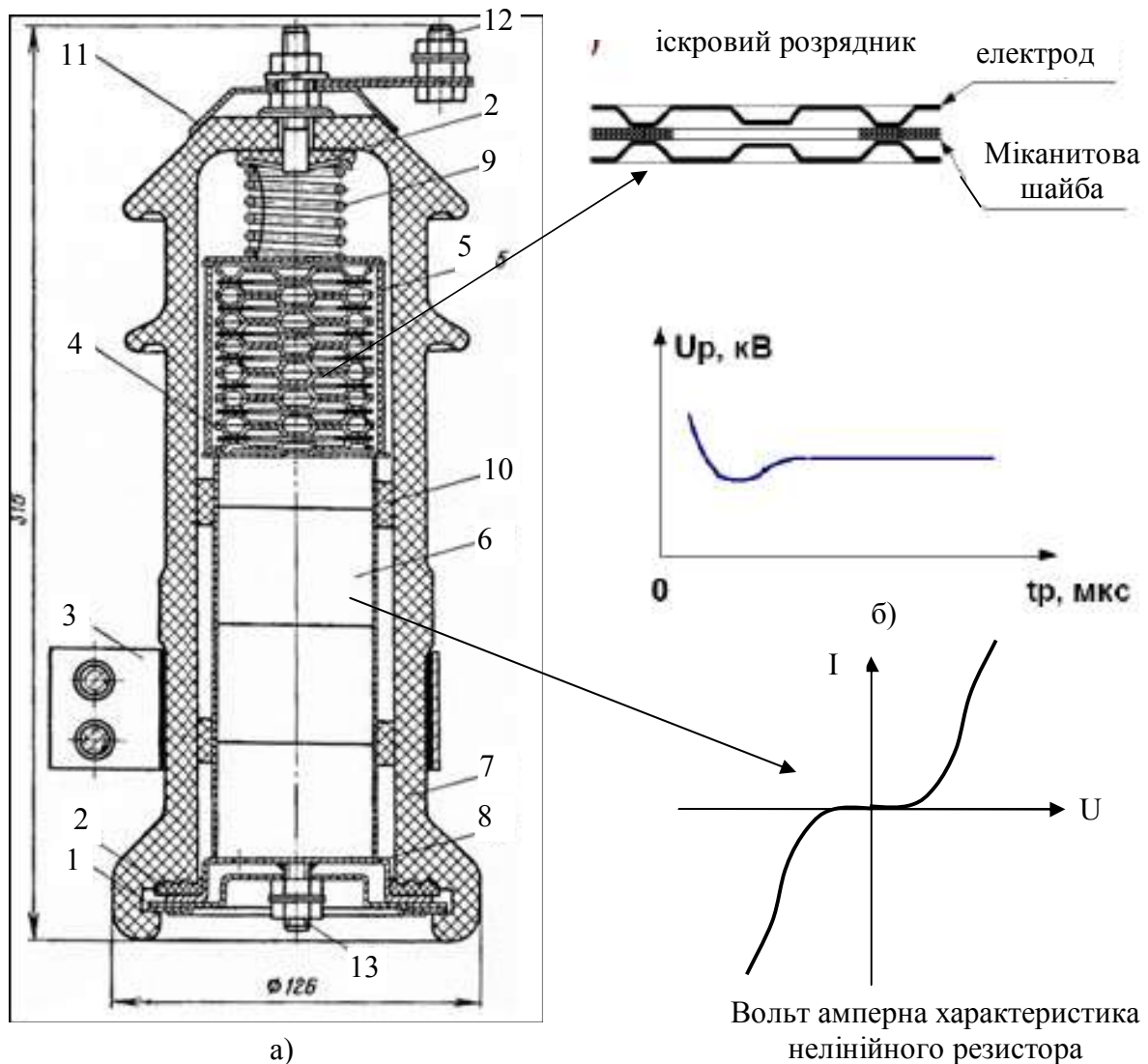


Рис.4.16 Конструкція (а) та вольт-секундна характеристика (б) вентильного розрядника РВ-10:

1 – нижній фланець; 2 – герметик; 3 – фланець кріплення; 4 – іскрові розрядники; 5 – ізоляційний корпус розрядників; 6 – нелінійні робочі резистори; 7 – корпус вентильного розрядника; 8,13 – заземлений електрод; 9 – пружина; 10 – демпфуюче прокладення; 11,12 – високовольтний електрод

Іскрові проміжки служать для відділення нелінійного опору від постійної дії робочої напруги і струму, що протікає через нього, і який руйнує нелінійний опір. Нелінійний опір служить для обмеження супроводжуючого струму до величини, яка необхідна для гасіння дуги.

Імпульс перенапруги пробиває іскровий проміжок і крізь вентильний розрядник протікає струм, який створює падіння напруги на резисторі. Завдяки нелінійній ВАХ напруга на резисторі змінюється мало при значних коливаннях імпульсу струму. Після гасіння дуги розрядник повертається в початковий стан і готовий до повторної роботи. Число спрацьовувань вентильного розрядника складає - 20 або 50. У простих вентильних розрядниках (типу РВС, РВП) струм гасіння дуги складає 80 А, а у сучасних – струм гасіння дуги досягає 250 А.

Матеріалами НС є віліт (SiC з рідким склом) і тервіт (або тирит – SiC з глиною). Вольт-амперна характеристика їх описується вираженням

$$U = K \cdot I^\alpha$$

де α - коефіцієнт вентиляльності; K - постійна. Для віліта $\alpha = 0,11-0,2$; для тервіта $\alpha = 0,15-0,25$.

Вентильні розрядники діляться на 4 групи. Найкращі захисні властивості мають розрядники першої групи, але вони і дорогі.

Важлива характеристика вентильного розрядника – залишкова напруга $U_{зал}$ на резисторі при визначеному імпульсному струмі (5...14 кА), яка зветься *струмом координації*. Вона повинна бути, як і пробивна $U_{пр}$, на 20...25% нижча розрядної напруги ізоляції. Услід за імпульсним струмом крізь вентильний розрядник йде супровідний струм промислової частоти. При цьому опір резистора різко зростає, струм обмежується (при $U_{роб}$) і при переході через «0» дуга гасне.

Найбільша напруга промислової частоти на вентильному розряднику, при якій надійно обривається супровідний струм, називається *напругою гасіння* $U_{гас}$, а відповідний супровідний струм – *струмом гасіння*. Дугогасна дія іскрового проміжку вентильного розрядника характеризується *коефіцієнтом гасіння*:

$$k_{гас} = \frac{U_{гас}}{U_{гас}} \quad (4.10)$$

де $U_{гас} = k_3 \cdot U_{НОМ}$

k_3 – коефіцієнт залежний від способу заземлення нейтралі: для пристроїв із заземленою нейтраллю $k_3 = 0,8$; для ізольованої нейтралі $k_3 = 1,1$.

$U_{пр} \approx$ – пробивна напруга іскрових проміжків.

Захисна дія нелінійного резистора також характеризується *коефіцієнтом захисту*:

$$k_{ЗАХ} = \frac{U_{зал}}{\sqrt{2} \cdot U_{гас}} \quad (4.11)$$

Для надійного захисту ізоляції підстанцій вольт секундна характеристика багаторазового іскрового проміжку повинна бути положистою. Схема заміщення багаторазового іскрового проміжку представляє ємнісний ланцюжок, подібно до схеми заміщення гірлянди. Імпульсна напруга по ланцюжку розподіляється дуже нерівномірно, забезпечуючи швидкий каскадний пробій одиничних проміжків. Це разом з попередньою іонізацією забезпечує низькі коефіцієнти імпульсу і положистий характер вольт секундної характеристики вентильного розрядника (рис.4.17).

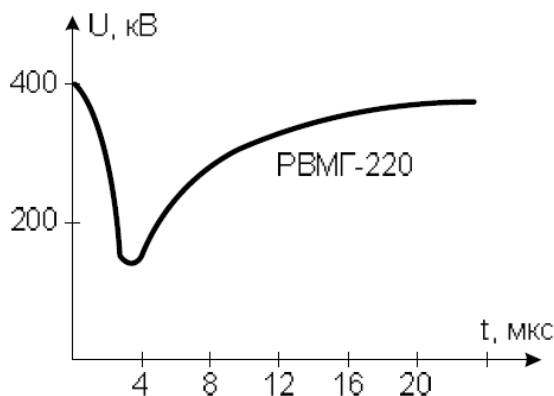


Рис.4.17 Вольтсекундна характеристика вентильного розрядника типу РВМГ-220

Нелінійний резистор виготовлений з порошку електротехнічного карборунду SiC , частинки якого вкриті тонким непровідним шаром (100 мкм) SiO_2 . При $U_{роб}$ опір цього запірного шару $R_{шару} = 10^6$ Ом·м. При

напрузі $U_{проб.}$ опір стає 10^{-2} Ом·м і імпульсний струм прямує в землю. Властивість матеріалу різко змінювати свій опір залежно від U , забезпечуючи проходження дуже великих струмів при високих напругах і малих струмів називають *вентильністю*.

Пропускна спроможність розрядника характеризується максимальним значенням імпульсу струму тривалістю 20÷40 мкс і струмом прямокутної форми тривалістю 2 мс. Цей режим вентильний розрядник повинен витримати не менш 20 разів.

Комбіновані розрядники РВМК (рис.4.18) призначені для обмеження як грозових, так і внутрішніх перенапруг 330...750 кВ. У них частина резистора зашунтована додатковим іскровим проміжком, який при внутрішніх перенапругах не пробивається (струм менше 1,5 кА), а при струмах більше 1,5 кА частина резистора шунтується і залишкова напруга знижується. Шунтуючі резистори служать для вирівнювання розподілу напруги по елементарних розрядних проміжках з метою виключення помилкового спрацьовування розрядника.

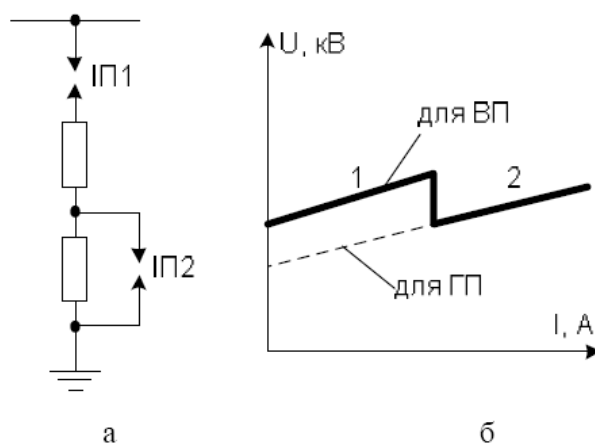


Рис.4.18 Схема (а) та вольт амперна характеристика комбінованого вентильного розрядника

4.5.4. Обмежувач перенапруг нелінійний

Недолік вентильного розрядника – мала нелінійність резистора, внаслідок чого на ньому падає залишкова напруга, яка прикладена до лінії. Тому імпульс перенапруги обмежується лише частково і продовжує рухатись по лінії, набігаючи на електроустаткування. На основі оксиду цинку (ZnO) розроблено більш ефективний тип захисних апаратів – обмежувачі перенапруг нелінійні, перевага яких полягає в глибокому обмеженні перенапруг, у тому числі міжфазних, за рахунок значно більшої нелінійності резистора, ніж у вентильному розряднику (рис.4.19).

Апарат має малі габарити та велику пропускну здатність імпульсних струмів. Нелінійний обмежувач напруг комплектують у вигляді паралельно з'єднаних стовпчиків нелінійних резисторів (варисторів) з дисків діаметром 28 і висотою 8 мм. Кількість стовпчиків варіюється від 4 (на 110 кВ) до 30 (на 750

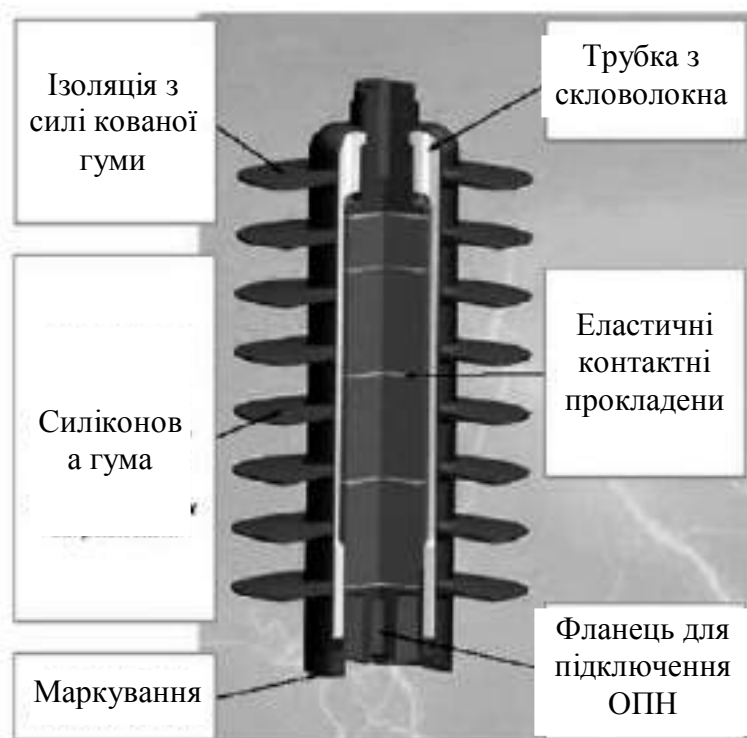


Рис.4.19 Нелінійний обмежувач напруги

підвищеною напругою від 0,15 с до 20 хв. ОПН дозволяє глибоко обмежувати і міжфазні перенапруги за допомогою схеми з іскровими проміжками (рис.4.20).

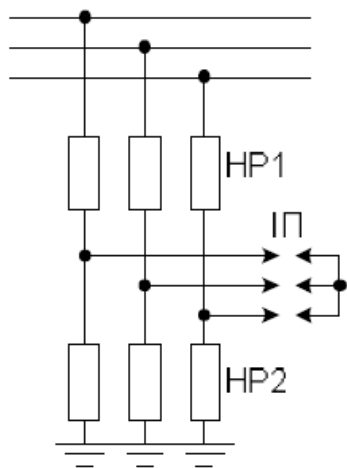


Рис.4.20 Схема підключення ОПН з іскровими проміжками:
 НР1, НР2 – нелінійні резистори;
 ІП – іскровий проміжок

кВ). Коефіцієнт нелінійності нелінійного обмежувача напруг при комутаційних перенапругах дорівнює 0,03...0,05, при грозових – 0,07...0,1. Висока нелінійність забезпечує проходження струмів від часток міліампера до декілька кілоампер, що дозволяє підключати його до мережі без іскрового проміжку. У нелінійного обмежувача напруг немає поняття напруги гасіння, але тривалий вплив резонансних перенапруг, обумовлює проходження великих струмів і може привести до порушення теплового балансу і руйнування апарату. Тому для ОПН обмежено час впливу

При комутаційних перенапругах, які завжди несиметричні, пробиваються іскрові проміжки ІП. Резистори НР2 – з'єднуються паралельно, а резистори НР1 – попарно на міжфазні напруги. При відновленні нормального режиму струм в ІП зменшується до міліамперів і дуга в них гасне.

Високонелінійні оксидно-цинкові резистори випускаються у вигляді дисків діаметром від 28 до 85 мм. Нелінійний обмежувач напруг виконується шляхом послідовного і паралельного включення таких резисторів. При робочій напрузі через одну паралельну колонку резисторів протікає струм в долі міліампера, і часто необхідність в іскровому проміжку (ІП) відпадає.

Як підсумок наведемо кратності основних типів комутаційних перенапруг:

1. Дугові замикання на землю (ізольована нейтраль). Кратність перенапруг 3.0-3.5.
2. Дугові замикання на землю (нейтраль з дугогасним реактором). Кратність перенапруг 2.6.
3. Дугові замикання на землю (резистивно-заземлена нейтраль) Кратність перенапруг 2.4-2.6.

4. Резонансні перенапруги. Кратність перенапруг до 4.0.
5. Включення електродвигунів. Кратність перенапруг 2.6-3.3.
6. Включення електродвигунів при наявності короткого однофазного замикання на землю. Кратність перенапруг 3.4.
7. Автоматичне повторне включення електродвигунів. Кратність перенапруг 4.0-4.5.
8. Включення високовольтної лінії при наявності в мережі сети короткого однофазного замикання на землю. Кратність перенапруг 3.0-3.5.
9. Відключення ненавантажених високовольтних ліній. Кратність перенапруг 3.0-4.5.
10. Відключення ненавантажених трансформаторів. Кратність перенапруг 5.0-6.0.
11. Відключення при двофазному короткому замиканні на землю. Кратність перенапруг 3.3.
12. Відключення електродвигунів, які обертаються. Кратність перенапруг 4.0-5.0.
13. Відключення загальмованих електродвигунів. Кратність перенапруг 5.0-6.0.

Контрольні питання до розділу 4

1. Класифікація та характеристики перенапруг
2. Основні види зовнішніх перенапруг
3. Основні види внутрішніх перенапруг.
4. Основні види комутаційних перенапруг
5. Основні характеристики перенапруг.
6. Перенапруги при відключенні конденсаторів і ненавантажених високовольтних ліній
7. Перенапруги при відключенні ліній з коротким замиканням
8. Перенапруги при відключенні ненавантажених трансформаторів
9. Принцип дії та конструкція та недоліки захисних проміжників (розрядників)
10. Принцип дії та конструкція та недоліки трубчастих розрядників
11. Принцип дії та конструкція та недоліки вентильних розрядників
12. Принцип дії та конструкція та недоліки обмежувачів перенапруг нелінійних

5. СУДНОВЕ ВИСОКОВОЛЬТНЕ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

Застосування високовольтних систем на морських судах значною мірою змінює філософію безпечної експлуатації суднового електроустаткування, що в першу чергу відображується у Вимогах міжнародної електротехнічної комісії (МЕК) і класифікаційних суспільств відносно проектування, виготовлення і установки високовольтного устаткування, а також в стандартах компетенції суднового персоналу, потрібних Положеннями конвенцій Міжнародної морської організації (ІМО), Правилами, інструкціями і іншими нормативними документами Морських Адміністрацій відносно безпечної експлуатації високовольтного устаткування.

5.1. Вимоги до високовольтного електрообладнання на напругу вище 1000 В

5.1.1 Загальні вимоги

Данні вимоги застосовуються до трифазних систем змінного струму з номінальною напругою, що перевищує 1 кВ, де під номінальною напругою розуміється напруга між фазами.

5.1.1.1 Розподіл високовольтного і низьковольтного устаткування.

Електричне обладнання на напругу вище 1000 В не повинно встановлюватися в ті ж корпуси (оболонки), де встановлено низьковольтне електрообладнання, інакше необхідно забезпечити відповідні заходи, що забезпечать безпечний доступ для обслуговування низьковольтного устаткування.

Ізоляційні матеріали, які використовують для електричного устаткування, повинні забезпечувати під час експлуатації установки опір ізоляції 1500 Ом на 1 В номінальної напруги, але не менше 2 МОм.

Біля входу в спеціальні електричні приміщення повинні знаходитися застережні написи, що вказують величину напруги. Корпуси електричного устаткування, встановленого поза спеціальними електричними приміщеннями, повинні забезпечуватися застережними написами, що вказують величину напруги.

5.1.2 Проектування системи

5.1.2.1 Системи розподілення електричної енергії.

Для високовольтних установок змінного трифазного струму допускається застосування наступних систем розподілення електричної енергії::

- трьохдротової ізольованої системи;
- трьохдротової системи з нейтраллю, яка з'єднана з корпусом через високоомний резистор або реактор;

- чотирьохдротової системи з глухо заземленою нейтраллю.

Конфігурація мережі для забезпечення безперебійності живлення повинна передбачати таку конструкцію головного розподільного щита яка передбачає можливість його розподілу, як мінімум, на дві незалежні половини секцій за допомогою міжсекційного автоматичного вимикача або роз'єднувача. До кожної половини секцій має бути підключений, як мінімум, один генератор.

Якщо передбачаються два незалежних головних розподільних щита, які з'єднуються між собою кабельними перемичками, то автоматичні вимикачі мають бути передбачені на обох її сторонах. Усі дубльовані електричні приводи повинні отримувати живлення від різних головних розподільних щитів або його розділених секцій.

В системах із заземленою нейтраллю необхідне виконувати наступні вимоги:

- Нульові точки генераторів, що включаються на паралельну роботу, допускається підключати на загальну шину перед заземляючим резистором або реактором, встановленим в розподільному щиті або безпосередньо у генераторів.
- У разі замикання на корпус струм витоку не повинен перевищувати номінального струму найбільшого генератора або сумарного номінального струму відповідної секції головного розподільного щита і не має бути меншим, ніж триразовий мінімальний струм, потрібний для спрацьовування захисту від замикання на корпус.
- Повинно бути забезпечено, щоб, як мінімум, одна точка заземлення нейтралі була включена, коли система знаходиться під напругою.
- Електричне устаткування, що працює в системах з глухо заземленою нейтраллю або з нейтраллю, сполученою з корпусом через високоомний резистор або реактор, повинне витримувати без ушкодження струми однофазного замикання на корпус впродовж часу, необхідного для спрацьовування пристрою захисту.
- У нульовому дроті кожного генератора має бути передбачений роз'єднувач, яким можна відключати нейтраль від заземлення для проведення вимірів опору ізоляції і обслуговування генератора.
- З'єднання з корпусом виконується таким чином щоб усі імпеданси (повні опори) нульових точок, що заземляються, були з'єднані з корпусом. З'єднання має бути виконане так, щоб будь-які циркулюючі струми заземляючих з'єднань не впливали на радіоустаткування, радари, а також на ланцюзі внутрішнього зв'язку і системи управління.
- Допускається приєднання усіх резисторів або реакторів до загальної заземляючої шини, яка, принаймні, в двох місцях має бути з'єднана з корпусом.
- В системах, що розділяються із заземленою нейтраллю з'єднання нейтралі з корпусом мають бути передбачені для кожної розділеної групи секцій головного розподільного щита

5.1.2.2 Ступені захисту корпусів (оболонок).

Кожна частина електроустаткування повинна мати захисні оболонки, що відповідають розташуванню електроустаткування і впливу на нього навколишніх умов. Вимоги стандарту Міжнародної електротехнічної комісії МЕК 60092-201 можуть розглядатися як мінімальні.

Захист електричних машин.

- Ступень захисту оболонок електричних машин має бути не нижче, ніж IP23.
- Ступень захисту коробок виводів машин має бути не нижче, ніж IP44.
- Для двигунів, що встановлюються в приміщеннях, доступних для непідготовленого персоналу, ступень захисту оболонки має бути не нижче, ніж IP4х для виключення дотику до струмопровідних або деталей, що обертаються.

Захист трансформаторів.

- Ступень захисту оболонок трансформаторів має бути не нижче, ніж IP23.
- Для трансформаторів, що встановлюються в приміщеннях, доступних для непідготовленого персоналу, міра захисту оболонки має бути не нижче, ніж IP4х.
- Трансформатори, які не поміщені в оболонку, повинні встановлюватися в спеціальному приміщенні, яке фактично є його оболонкою, вхід в таке приміщення не можливий доки не буде відключена висока напруга, а струмопровідні частини не будуть заземлені.

Захист розподільних пристроїв, щитів управління і конвертерів.

- Ступень захисту металевих оболонок розподільних щитів, щитів управління, шафів статичних перетворювачів має бути не нижче, ніж IP32.
- Для щитів, що встановлюються в приміщеннях, доступних непідготовленому персоналу, ступень захисту оболонки повинен передбачатися не нижче, ніж IP4х.

В таблиці 5.1 наведені вимоги до ступені захисту електрообладнання IPxx.

Табл.5.1 Класи ступеню захисту електрообладнання від зовнішнього середовища IPxx:

цифра	Перша цифра: захист від бруду (пилі)	Друга цифра: захист від води
0	Захист відсутній	Захист відсутній
1	Захист від твердих часток розмірами більш 50 мм	Захист від капель води, які падають вертикально
2	Захист від твердих часток розмірами більш 12 мм	Захист від капель води, які падають з відхилення не більш 150°
3	Захист від твердих часток розмірами більш 2,5 мм	Захист від дощу
4	Захист від твердих часток розмірами більш 1 мм	Захист від водних бризгів
5	Захист від пилі	Захист від водних струмів під тиском
6	Повний захист від пилі	Захист від водних струмів під тиском 20 кПа
7	-	Захист від занурювання на глибину не більш 1 м.
8	-	Захист від затоплення (глибина вказується додатково)

5.1.2.3 Ізоляційні відстані.

Згідно вимогам Російського Регістру судноплавства до електричного обладнання з напругою вище 1000 В до 15 кВ ізоляційні відстані повинні бути:

- Ізоляційні відстані по повітрю між частинами, що знаходяться під напругою з різними потенціалами, або між частинами під напругою і заземленими металевими частинами, або зовнішнім кожухом, мають бути не менш вказаних в таблиці. 5.2. Мінімальні відстані для проміжних значень робочої напруги вибираються, як для наступного, більшого значення стандартної напруги.
- При виборі менших відстаней мають бути передбачені спеціальні імпульсні високовольтні випробування, що підтверджують допустимість такого вибору
- Ізоляційні відстані по поверхні матеріалів між частинами, що знаходяться під напругою з різними потенціалами, і між частинами, що знаходяться під напругою, і корпусом повинні вибиратися на основі національних або міжнародних стандартів.
- Для не стандартизованих частин електроустановки, шин, що включають секції, в розподільних пристроях, мінімальні відстані по поверхні матеріалу мають бути розраховані із співвідношення 25 мм на 1 кВ, а за струмообмежувальними пристроями - 16 мм на 1 кВ.

Табл. 5.2 Мінімальна відстань між шинами по повітрю згідно вимогам Російського Регістру

Мінімальна напруга, кВ	Мінімальна відстань за повітрям, мм
3 (3,3)	55
6 (6,6)	90
10 (11)	120
15	160

Згідно вимогам Норвежської адміністрації водних та енергетичних ресурсів до електричного обладнання з напругою вище 1000 В до 15 кВ ізоляційні відстані по повітрю повинні бути не менш вказаних в табл. 5.3.

Табл. 5.3 Мінімальна відстань між шинами по повітрю згідно вимогам Норвежської адміністрації

Номинальна напруга, В	Мінімальний розмір зазору між шинами по повітрю	
	Головний розподільний щит	Інше обладнання
<1100	14	14
<3300	32	26
<6600	60	50
≤11000	100	80

Згідно вимогам British Standards відстань між кріпленнями та ізоляційні відстані по повітрю повинні бути не менш вказаних в табл. 5.4.

Табл. 5.4 Мінімальна відстань між шинами по повітрю згідно вимогам British Standards

Номінальна напруга, В	Мінімальна відстань між фазами і землею, мм	Мінімальна відстань між кріпленням фазами і землею, мм
1100	25	25
2400	40	40
3300	50	50
4160	60	70
6600	65	90
11000	80	125
13800	85	140
15000	95	150

5.1.2.4 Пристрої захисту.

Замикання на стороні генератора.

- Окрім основних видів захисту генератори мають бути забезпечені пристроями захисту проти міжфазного короткого замикання в кабелі, який живить генератор і головному розподільному щиті і проти міжвиткових замикань усередині генератора.
- При спрацьовуванні цього пристрою захисту генератор повинен відключатися від головного розподільного щита і його збудження повинне автоматично зніматися.
- У розподільних системах з глухо заземленою нейтраллю замикання фази генератора на корпус повинне також призводити до спрацьовування захисту.

Замикання на корпус.

- При будь-яких замиканнях на корпус в системі повинна спрацьовувати звукова і світлова сигналізація.
- У низкоімпедансних (глухо заземлених) системах при замиканнях на корпус повинен спрацьовувати захист, що автоматично відключає пошкоджений ланцюг.
- У високоімпедансних заземлених системах (у системах із заземленою через високоомний резистор нейтраллю), якщо фідери, які відходять від головного розподільного щита, не можуть бути відключені у разі замикання на корпус, ізоляція електроустаткування, яке одержує живлення від цих фідерів, має бути розрахована на лінійну напругу системи.

Силові трансформатори.

- Силові трансформатори мають бути захищені від короткого замикання і від перевантаження автоматичними вимикачами.
- Якщо трансформатори призначені для паралельної роботи, спрацьовування захисту на первинній стороні повинне призводити до автоматичного відключення його також на вторинній стороні.

Трансформатори напруги для систем управління і вимірювальних приладів.

Трансформатори, які призначені для живлення ланцюгів управління і приладів, мають бути захищені від перевантаження і короткого замикання на вторинній стороні.

Запобіжники.

- Плавкі запобіжники повинні застосовуватися для захисту від коротких замикань.
- Для захисту від перевантаження застосування запобіжників не допускається.

Низьковольтні системи.

Низьковольтні системи розподілення (до 1000 В), які одержують живлення від високовольтних трансформаторів (систем), повинні мати захист від перенапружень, пов'язаних з попаданням високої напруги на вторинну (низьковольтну) сторону. Це може бути реалізовано наступним::

- застосуванням заземленої низьковольтної системи;
- відповідними обмежувачами напруги нейтралі;
- заземленням екрану між первинною і вторинною обмотками трансформатора.

Захисні заземлення.

- Металеві корпуси електричного устаткування мають бути заземлені зовнішніми мідними гнучкими провідниками перерізом, розрахованим на струм однофазного короткого замикання, але не менше 16 мм².
- Заземляючі дроти мають бути маркіровані.
- Заземляючі провідники можуть з'єднуватися зварюванням або болтами діаметром не менше 10 мм.

5.1.3 Електричні машини

5.1.3.1 Обмотки статорів генераторів.

У статорних обмоток генераторів мають бути доступними як фазні виводи, так і нульові для можливості установки диференціального захисту.

5.1.3.2 Датчики температури.

Електричні машини мають бути обладнані вбудованими датчиками температури статорних обмоток, які забезпечуються звуковою і світловою сигналізацією при перевищенні температури понад допустимими межами

Для вбудованих датчиків температури мають бути передбачені засоби (пристрої) захисту від попадання високої напруги у вимірювальні ланцюги.

5.1.3.3 Випробування.

Додатково до випробувань, які потрібних для усіх електричних машин, мають бути передбачені випробування високочастотною випробувальною

напругою відповідно до стандарту МЭК 60034-15 окремих фазних обмоток (катушок) машин, що підтверджують достатній рівень стійкості проти міжвиткових замикань, що викликаються імпульсними сплесками напруги з високою крутизною фронту.

5.1.3.4 Конструкція.

Корпус машини, підшипникові щити, захисні огорожування повітряне забірних і випускних отворів мають бути виготовлені із сталевих сплавів. Алюмінієві сплави для вказаних деталей машин не допускаються.

Для відведення конденсату в нижній частині корпусу машини повинно бути передбачено легко доступний для обслуговування спусковий пристрій.

На двигунах вертикального виконання згори має бути передбачений жорстко закріплюваний козирок, що захищає від попадання всередину машини води і сторонніх предметів. Нижній торцевий щит повинен мати форму, що запобігає скупченню води в районі підшипника. .

Коробки виводів машин повинні мати такі розміри, щоб забезпечувати:

- необхідні ізоляційні відстані між струмопровідними частинами і корпусом
- необхідні ізоляційні відстані між фазами
- достатній простір для розміщення кінцевих закладень кабелів підключення і виводів обмоток, можливість зміни розташування введень живлячих кабелів до чотирьох положень під кутом 90°.

Для вимірювальних трансформаторів струму, нагрівального антиконденсаційного елементу, датчиків температури і тому подібне має бути передбачена окрема клемна коробка

Виводи фаз обмоток статора повинні входити в окрему коробку, яка відрізняється від коробок на нижчу напругу, клемну коробку через прокладення ущільнювача.

Для нейтральних виводів може бути передбачена окрема клемна коробка.

Усередині клемних коробок мають бути передбачені клеми для заземляючих жил кабелів. При цьому має бути забезпечене надійне електричне з'єднання між корпусом машини і корпусом коробки.

Двигуни номінальною потужністю 1000 кВт і більше мають бути обладнані пристроями диференціального захисту. Для цієї мети на корпусі двигуна має бути передбачена окрема коробка виводів, що розташовується з протилежного боку від головної коробки, в якій мають бути передбачені настановні місця для трьох трансформаторів струму і виводів нейтральних кінців обмоток.

Температура підшипників двигунів потужністю 1000 кВт і більше повинна контролюватися місцевими індикаторами (приладами). Для кожного підшипника мають бути передбачені також датчики температури для дистанційного контролю.

Для запобігання шкідливому впливу підшипникових струмів підшипник на стороні, протилежній до приводу, має бути електричне ізолюваний від

корпусу. Має бути передбачена можливість виміру опору ізоляції ізолюваного підшипника без його демонтажу.

Конструкція підшипників ковзання повинна передбачати:

- місцеві показники рівня мастильного масла;
- при примусовому циркуляційному мастилі - окремий насос з локальним трубопроводом, місткістю, охолоджувачем, фільтром і показником витрати;
- можливість установки приладів вібраційного контролю, включаючи необхідні кабельні лінії, а також приладів виміру зносу підшипника;
- можливість реалізації блокування пуску двигуна за відсутності мастила.

5.1.4 Силкові трансформатори

- Силкові трансформатори повинні задовольняти наступним вимогам:
- Сухі трансформатори повинні відповідати вимогам стандарту МЭК 60726.
- Використуємі сухі трансформатори повинні мати заземлені екрани між обмотками вищого і нижчого напруги.
- Трансформатори з рідинним охолодженням повинні відповідати вимогам стандарту МЭК 60076.
- Трансформатори, які занурені в масло, що охолоджує, мають бути обладнані, як мінімум, пристроями АПС і захисту по наступних параметрах:
 - "Мінімальний рівень рідини" - АПС і автоматичне відключення;
 - "Максимальна температура рідини" - АПС і автоматичне відключення, або зниження навантаження;
 - "Високий тиск газу в оболонці" - автоматичне відключення.
- Трансформатори, що встановлюються в приміщеннях, доступних некваліфікованому персоналу, повинні мати міру захисту оболонки не нижче, ніж IP4x.
- Якщо на стороні низької напруги трансформаторів є ізолювана нульова точка, то між нульовою точкою кожного трансформатора і корпусом платформи має бути передбачений іскророзрядний запобіжник. Запобіжник має бути розрахований не більше ніж на 80 % мінімальної випробувальної напруги споживачів, що живляться від цього трансформатора.
- До розрядника допускається паралельне приєднання апаратури для контролю стану ізоляції на низьковольтній стороні установки або для виявлення місця ушкодження цієї ізоляції. Така апаратура не повинна перешкоджати надійній дії розрядника.
- Мають бути передбачені ефективні засоби (наприклад, підігрів) для запобігання конденсації і накопиченню вологи усередині трансформаторів, коли вони вимкнені.

5.1.5 Кабелі

Кабелі мають бути виготовлені відповідно до вимог стандартів МЭК 60092-353 і 60092-354 або інших відповідних національних стандартів.

Кабельна мережа трифазного струму повинна виконуватися трьохжильними кабелями з багатодротяними жилами. Площа поперечного перерізу жили кабелів для силових ланцюгів має бути не менше 10 мм².

Конструкція, тип і струмові навантаження вживаних кабелів, які допускаються, є в кожному випадку предметом спеціального розгляду Регістром.

Вимоги.

Штамповані кабелі в твердій діелектричній оболонці для номінальної напруги від 1 кВ до 10 кВ повинні відповідати наступним спеціальним вимогам:

- Ізоляція на базі суміші гуми з поліетиленом (XLPE) або етиленпропіленом повинна використовуватися тільки як ізоляція кабельних жил. Бутилова гума, PVC і термопластичний поліетилен не застосовувати.
- Провідникове екранування потрібно для усіх кабелів з XLPE ізоляцією, а також для EPR ізольованих кабелів номінальною напругою U_0/U вище 3.6/6 кВ.
- Ізоляційне екранування потрібно для усіх кабелів
- Для покриваючих матеріалів мають бути використані тільки типи, вказані в публікації МЭК № 92-359, тобто PVC або хлорсульфатний поліетилен.
- Величина номінальної напруги кабелю (U) повинна як мінімум відповідати номінальній напрузі системи.
- У системах з високоомним заземленням нейтралі, які не мають роз'єднувачів, при несправності заземлення, а також в системах з ізольованою нейтраллю клас напруги між фазою і землею має бути таким же, як номінальна напруга системи. Ця вимога говорить про те, що наприклад, в установках на 6 кВ з ізольованою нейтраллю, не можуть застосовуватися кабелі напругою класу $U_0/U=3.6/6$ кВ. Для них повинні використовуватися кабелі підвищеного класу 6/10 кВ

Прокладення.

- Кабелі високої напруги повинні прокладатися окремо від кабелів нижчої напруги, тобто не групуватися разом в одному кабелепроводі.
- Прокладення високовольтних кабелів через житлові приміщення дозволяється тільки після спеціального схвалення Електроінспекцією залежно від застосування.
- Високовольтні кабелі повинні мати спеціальне маркування.
- Для виводів і з'єднань, незахищених ізольованими металевими екранами, ізоляційні відстані повинні виконуватися згідно вимоги стандартів МЭК 60092-353 і 60092-354.
- Кабельні з'єднання не повинні виконуватися в таких же корпусах, як і для устаткування низьких напруг.

Випробування.

Кабелі з виводами і з'єднаннями повинні після прокладення піддаватися випробуванню на напругу згідно з розділом 18 публікацій № 502(1975) "Extruded Solid Dielectric insulated power cables for rated voltages from 1kV up to 30kV". Це означає випробування напругою постійного струму величиною як мінімум $4 \times U_0$ впродовж 15 хвилин (U_0 - номінальна напруга кабелю між фазою і землею).

Як альтернатива, випробування може бути виконане змінною напругою. Проте це повинно бути узгоджено з виробником кабелю.

5.1.6 Розподільні пристрої і щити управління

Розподільні щити і щити управління мають бути виготовлені відповідно до вимог стандарту МЕК 60298 і наступними додатковими вимогами.

Конструкція.

- Розподільні щити мають бути виготовлені з металу і бути закритого типу - відповідно до вимог стандарту МЕК 60298, або з ізолюючих матеріалів і бути закритого типу - відповідно до вимог стандарту МЕК 60466 або відповідно до вимог національних стандартів.
- Розподільні щити повинні закриватися спеціальним ключем, що відрізняється від ключів розподільних щитів і пристроїв низької напруги. Відкривання дверей або висунення окремих елементів має бути можливе тільки після відключення від електричної мережі цієї панелі або розподільного щита.
- Уздовж розподільних щитів слід забезпечити проходи для огляду щита і електричної апаратури шириною не менше 800 мм між перегородкою і щитом і 1000 мм між паралельно встановленими секціями щита. Якщо такі проходи призначені для обслуговування, їх ширина має бути збільшена до 1000 і 1200 мм, відповідно.
- Вказану ширину цих проходів потрібно зберігати незалежно від роду вживаних засобів захисту від дотику, виконаних у вигляді дверей, сітки або ізоляційних поручнів.
- Двері, суцільні перегородки і перегородки з сітки мають бути заввишки не менше 1800 мм.
- Перфоровані перегородки або перегородки з сітки повинні забезпечувати міру захисту не нижче, ніж IP2x. Уздовж щита мають бути передбачені два ряди ізоляційних поручнів на висоті 600 і 1200 мм.
- Частини електричної установки, що знаходяться під напругою, мають бути розташовані на відстані від захисних огорожувальних не менш вказаного в таблиці 5.5

Табл.5.5 Мінімальні відстані електричних частин під напругою від типу захисних загороджень

Номинальна напруга, кВ	Мінімальна висота проходу, мм	Мінімальні відстані електричних частин під напругою від різних видів захисних загороджень, мм		
		Суцільні двері і перегородки	Сітчасті двері і перегородки	Ізоляційні поручні
3 (3,3)	2500	100	180	600
6 (6,6)	2500	120	200	600
10 (11)	2500	150	220	700
15	2500	160	240	800

Блокувальні пристрої.

До блокувальних пристроїв пред'являються наступні вимоги:

- Автоматичні висувні вимикачі, які використовуються в розподільних щитах, повинні мати пристрій, який фіксує їх як в робочому, так і у висуненому положенні. Для забезпечення безпечного обслуговування висувних вимикачів і інших апаратів мають бути передбачені блокувальні ключі і блокувальні роз'єднувачі..
- Висувні автоматичні вимикачі повинні фіксуватися в робочому положенні так, щоб виключалися можливі відносні переміщення між рухливими і нерухомими частинами.
- Повинне передбачатися автоматичне закриття нерухомих струмопровідних контактів роз'єднувача за допомогою ізоляційних перегородок у висуненому положенні автоматичного вимикача.
- З метою забезпечення безпечного обслуговування високовольтних розподільних пристроїв для збірних шин і фідерів, які відходять від щита, має бути передбачено певне число апаратів для примусового замикання шин між собою і на корпус. Пристрій має бути розрахований на максимальний струм короткого замикання. Такий пристрій за узгодженням з Регістром може бути переносним.

Допоміжна система живлення.

- Якщо для приводу механізмів автоматичних і інших вимикачів, а також для пристроїв захисту потрібно окремий допоміжний електричний або інше джерело енергії, то окрім основного такого джерела має бути передбачене резервне джерело, запас енергії якого має бути достатнім для дії усіх апаратів принаймні у двічі.
- Проте розчіплювачі автоматичних вимикачів, що спрацьовують від перевантаження, від короткого замикання або від "нульової" напруги, мають бути незалежними від будь-яких електричних джерел енергії.
- Ця вимога не забороняє застосування розчіплювачів, що спрацьовують при подачі оперативної напруги, за умови, що буде забезпечений контроль цілісності (безперервності) відмикаємих ланцюгів і їх системи живлення, тобто у разі порушення цілісності ланцюгів або при несправності (зникненні) їх живлення спрацьовуватиме аварійно-попереджувальна сигналізація.

- Для головних розділених щитів, для приводів механізмів автоматичних і інших вимикачів має бути передбачений, окрім власних джерел енергії, які одержують живлення кожен від своєї системи шин, принаймні одне незалежне резервне джерело.
- При необхідності цим джерелом може бути аварійне джерело електричної енергії, призначене для виведення механічної установки з повністю знеструмленого стану або "мертвого" стану.
- Кожен головний і інші розподільні щити мають бути випробувані високою напругою стандартної частоти. Процедура випробувань і величини випробувальної напруги повинні відповідати вимогам відповідного національного стандарту або МЕК 60298.

5.1.7 Розміщення

Електричне устаткування.

Якщо високовольтне устаткування без захисної оболонки встановлюється в спеціальному приміщенні, що фактично є його оболонкою, то двері такого приміщення повинні мати таке блокування, щоб їх відкриття було виключене, поки не буде відключено напругу, і струмопровідні частини устаткування не будуть заземлені.

У входів в приміщення або простори, де розташовано високовольтне устаткування, мають бути передбачені попереджувальні написи про наявність небезпечної високої напруги.

Електричне устаткування повинне встановлюватися в спеціальних електричних приміщеннях і мати ступень захисту не нижче, ніж IP23.

У обґрунтованих випадках може бути допущена установка устаткування поза спеціальними електричними приміщеннями за умови, що ступень захисту його буде не нижча, ніж IP44, і доступ до струмопровідних частин устаткування буде можливим тільки при знятій напрузі і при використанні спеціального інструменту.

У спеціальному електричному приміщенні повинні знаходитися схема з'єднань і креслення розміщення електричного устаткування.

Кабелі.

- Кабелі не повинні проходити через житлові приміщення. Проте, якщо це потрібно умовами технологічного характеру, таке прокладення допустиме в спеціальних закритих транзитних системах (конструкціях).
- Високовольтні кабелі повинні прокладатися в трасах, окремих від трас кабелів на напругу нижче 1000 В. Зокрема, високовольтні кабелі не повинні прокладатися в одних і тих же трасах, або в одних і тих же каналах або трубах, або в одних і тих же коробах з кабелями на напругу 1000 В і нижче. коробах з кабелями на напругу 1000 В і нижче.
- Якщо високовольтні кабелі різної номінальної напруги прокладаються в одних і тих же трасах, то ізоляційні відстані між кабелями мають бути не менш ізоляційних відстаней, встановлених для кабелю вищої напруги, як вказано в табл..5.2-5.4.

- Високовольтні кабелі повинні прокладатися в заземлених металевих трубопроводах або в металевих коробах, або вони мають бути захищені заземленими металевими кожухами.
- Відкрите прокладення кабелів (на штампованих несучих панелях) допускається, якщо вони мають безперервну металеву броню, яка має бути надійно і багаторазово заземлена.
- Окінцевання усіх жил високовольтних кабелів мають бути виконані з відповідного ізоляційного матеріалу. У з'єднувальних коробках, якщо жили кабелю не ізольовані, фази мають бути відокремлені від корпусу і один від одного міцними перегородками з відповідного ізоляційного матеріалу.
- Високовольтні кабелі, що мають провідний шар між фазами для контролю напруженості електричного поля ізоляції кабелю, повинні мати виводи, які призначені для такого контролю.
- Матеріал ізоляції виводів має бути сумісний з матеріалом ізоляції і оболонки кабелю, і виводи мають бути обладнані пристроями для заземлення усіх металевих екрануючих компонентів кабелю (металевих стрічок, дротів і тому подібне).
- Високовольтні кабелі повинні мати легко читану ідентифікаційне маркування.
- Перед введенням в експлуатацію нової високовольтної кабельної мережі або після її модернізації (ремонті або установки додаткових кабелів) усі кабелі окремо з їх елементами (окінцевання, заземляючі виводи і тому подібне) мають бути випробувані дією високою напруги. Випробування повинні проводитися після виміру опору ізоляції.
- Якщо випробування електричної міцності ізоляції виконуються напругою постійного струму, то випробувальна напруга має бути не нижче, ніж $1,6 (2,5U_0 + 2 \text{ кВ})$ - для кабелів з номінальною напругою U_0 , рівною 3,6 кВ і менш, і $4,2 U_0$ - для кабелів з номінальною напругою вище 3,6 кВ (де U_0 - номінальна напруга змінного струму номінальної частоти, для яких кабель був розроблений, що додається між кожною жилою і заземленням або його металевим екраном).
- Випробувальна напруга має бути прикладена на період часу не менше 15 хв. Після завершення випробувань жили кабелю мають бути заземлені на певний період часу, достатній для видалення придбаного електричного заряду. Після цього проводиться повторний вимір опору ізоляції кабелю.
- Якщо випробування електричної міцності ізоляції високовольтного кабелю виконуються випробувальною напругою змінного струму (відповідно до рекомендацій заводу - виробника), то величина випробувальної напруги має бути не менш номінальною, а тривалість напруги, що додається, має бути не менше 24 ч.

5.2 Основні типи суднового високовольтного обладнання

Суднове високовольтне обладнання підрозділяється на::

- Фіксоване електрообладнання - це устаткування, яке прикріплено до опори або до чого-небудь іншого в спеціальному положенні.
- Портативне електрообладнання - це устаткування, яке пересувається під час роботи або устаткування, яке може легко пересуватися з одного положення в інше для підключення до джерела живлення (ручні дрилі, пирососи та ін.)

Розглянемо основні типи суднового високовольтного обладнання

5.2.1. Комутаційна апаратура.

Комутаційна апаратура (Switchgear) є основним об'єктом, що охоплює механічні вимикаючі пристрої в комбінації з управляючим, попереджувальним і захисним устаткуванням. Збірки такого устаткування і пристроїв у вигляді шаф і стійок часто називають в силових електроустановках розподільними щитами (Switchboards). В основному сучасна комутаційна апаратура на 11kV, 6,6kV, і 3,3kV має металеві корпуси, які повинні заземлятися, і комплектуються з усім додатковим устаткуванням виключно для зовнішніх з'єднань.

До комутаційної апаратури відносять:

Перемикальне і контрольне устаткування (Switch gear and control gear) - це устаткування, що підключається в електричні ланцюги, з метою виконання однієї або більше з наступних функцій: захист, управління, розподілу та комутації.

Вимикачі - це неавтоматичний механічний пристрій, що з'єднує, або роз'єднує ланцюг при повному навантаженні. Вимикачі забезпечують передачу і розрив не лише номінального струму, але і аномального струму впродовж заданого часу, такого як струм короткого замикання, який вони нездатні обмежити. Вимикачі повинні мати незалежний ручний взвод, тобто по визначенню він має "запасену" енергію, що породжується ручним приводом, зберігається і реалізовується впродовж одного спрацьовування так, що швидкість і сила дії не залежать від дії оператора"

Багатополюсні перемикачі і механізми перемикання - це автоматичні вимикачі, окрім спеціальних, мають окремі контакти для одночасного з'єднання і роз'єднання усіх ізолюваних фаз (полюсів) ланцюгів, в яких вони використовуються.

Заземляючі вимикачі. У розподільних мережах вимикачі можуть бути об'єднані із заземляючими вимикачами ланцюгів, що відходять. Зазвичай, в такому ж корпусі заземляючі вимикачі здатні проводити і витримувати певний період часу струми короткого замикання, проте вони рідко призначаються для розриву струму. Доступ до ланцюгів вимикачів, коли вони об'єднані із заземляючим вимикачем, неможливий до тих пір, поки заземляючий вимикач не буде встановлений в положення заземлення.

Роз'єднувач або розціплювач (isolator & disconnecter - ізолюючий вимикач) - це механічний комутаційний пристрій, який забезпечує в розімкненому положенні

ізолюючу дистанцію відповідно до спеціальних вимог. Роз'єднувачі класифікується як роз'єднувальний пристрій, який не може в мережах високовольтного устаткування комутувати (з'єднувати або розривати) будь-які істотні струми, а лише забезпечує в розімкненому стані таку ізолюючу дистанцію, при якій не може мати місця ланцюг струму як для нормальної так і аномальної напруги. Роз'єднувач здатний нести струми нормального стану ланцюга і витримувати короткі замикання ланцюга певний час. Роз'єднувач здатний відключати і включати ланцюг при незначних струмах і несуттєвій напрузі між затисками полюсів. Роз'єднувачі застосовуються:

- у резервних системах шин, щоб полегшити перехід від одних шин до інших без розриву ланцюга;
- де роз'єднання потрібно не під навантаженням;
- на автоматичних вимикачах, що витягуються і які призначені для набору ланцюга заземлення. Під цю категорію підпадають усі висувні автомати, контактори і трансформатори напруги, що мають ізолюючі контакти і які часто обстежують.

Контактор - це механічний з електромагнітним або електронним управлінням пристрій, здатний забезпечувати включення і відключення повного навантаження. Контактори визначаються як механічні відключаючі пристрої, що мають тільки одне положення спокою і які діють не вручну. Вони здатні проводити і розривати струми при справних станах ланцюга, включаючи перевантаження і несправності заземлення, окрім випадків короткого замикання. Оскільки вони нездатні розривати струми короткого замикання, то вони зазвичай обладнуються запобіжниками для захисту контактора і системи. Контактори призначаються для частих операцій і їх часто застосовують у вакуумних переривниках, оскільки для них потрібно мінімальне обслуговування. Типи високовольтних контакторів можуть значно відрізнятися, проте основні властивості по безпеці повинні мати місце для більшості з них:

- Для виймальних контакторів має бути передбачене блокування, щоб запобігти його виїмці, коли він в замкнутому стані.
- Контактор не може вважатися замкнутим до тих пір, поки роз'ємні контакти не увійдуть повністю до зіткнення.
- Автоматичні шторки повинні перекривати доступ до контактів з напругою при виїмці рами.
- Контактор відключається за відсутності хоч би однієї вставки запобіжника, щоб запобігти роботі трифазного двигуна при обриві фази.
- В деяких контакторах вимикач заземлення автоматично включається в ланцюг заземлення при виїмці контакторних санчат. На інших типах це забезпечується ручним включенням вимикача, що блокується з контактором.

Автоматичні вимикачі (Автомати) містять механічні комутуючі пристрої, здатні включати, нести і розривати струми за нормальних умов, а також витримувати певний час і розривати струм при певних ненормальних станах ланцюга, таких, як коротке замикання. Автоматичний вимикач (Автомат)

визначається як механічний включаючий пристрій, здатний передавати, витримувати і розривати струми ланцюгів при нормальному їх стані, а також проводити, витримувати впродовж заданого часу і розривати струми при ненормальних станах ланцюга, таких як коротке замикання. Автоматичний вимикач з плавкими запобіжниками служить для розриву струмів короткого замикання, що перевищують розривну здатність автоматичних вимикачів.

Тип дугогасячого середовища є істотною особливістю для автоматів, це може бути об'ємно-масляні (Bulk Oil), мінімально масляні (Minimum Oil), вакуумні (Vacuum), повітряні (Air), газонаповненні (Sulphur Hexafluoride - Sf6), які зможуть виконувати усі їх задані функції. Зазвичай автомати призначаються для нечастих дій, але можуть бути використані також для управління двигунами на напругу від 11 кВ і нижче. Механізми автоматів можуть класифікуватися по наступних типах:

- незалежної ручної дії механічного пристрою включення. Енергія дії, що породжується ручним приводом, накопичується і витрачається впродовж однієї операції, таким чином, що швидкість і сила спрацьовування не залежить від дії оператора;
- залежної силової дії (з механічним розчіплювачем). Працює за рахунок неручної енергії, у яких завершення дії залежить від безперервності подачі живлення (до соленоїдів, електричним або пневматичним моторам і тому подібне);
- незалежної силової дії з механічним включаючим пристроєм. Запасена енергія дії, що поступила від зовнішнього силового джерела, реалізується за одну операцію, так, що швидкість і сила дії не залежать від дії оператора;
- залежного ручного управління з механічним пристроєм включення. Працює виключно за рахунок ручної енергії, що безпосередньо прикладається, так що швидкість і сила дії залежать від дій оператора. Цей тип автомата, будучи керованим оператором, є небезпечним і не експлуатується під живленням.

Автомати можуть бути ізолювані від мережі шляхом їх виїмки, як у вертикальному, так і в горизонтальному положенні залежно від конструкції приводу автомата. Вертикально ізолювані можуть обладнатися як шинними, так і контурними ланцюгами заземлення, а горизонтальні тільки контурним заземленням.

Засоби безпеки при обслуговування автоматів наступні :

- Найбільш важливим блокуванням автоматів є блокування при виїмці, яка запобігає виїмці автомата, що знаходиться в замкнутому стані.
- При виїмці блоку механічні блокування працюють так, щоб автомат, перш ніж він буде висунений і поставлений в положення для обслуговування, знаходився вже в розімкненому стані.
- Усі виїмальні одиниці мають автоматичні шторки, які відгороджують усі провідники, що знаходяться під напругою при виїмці автомата.

- Масляні автомати мають запобіжний клапан, щоб запобігти високому тиску газів, що утворюються в процесі гасіння дуги.
- Газонаповнені автомати обладнуються аварійною сигналізацією по низькому тиску газу, яка в деяких випадках блокує роботу автомата.
- Замикаючі засоби забезпечуються, щоб запобігти будь-якому доступу в зоні напруги.

5.2.1.1 Автоматичні вимикачі

Вимикачі призначені для оперативної і аварійної комутації в енергосистемах, тобто виконання операцій включення і відключення окремих ланцюгів при ручному або автоматичному управлінні. У включеному стані вимикачі повинні безперешкодно пропускати струми навантаження. Характер режиму роботи цих апаратів дещо незвичайний: нормальним для них вважається як включений стан, коли крізь їх контакти проходить струм навантаження, так і відключене, при якому вони забезпечують необхідну електричну ізоляцію між розімкненими ділянками ланцюга. Комутація ланцюга, здійснювана при перемиканні вимикача з одного положення в інше, робиться нерегулярно, час від часу, а виконання ним специфічних вимог по відключенню короткого замикання, що виникає в ланцюзі, надзвичайно рідко. Вимикачі повинні надійно виконувати свої функції впродовж терміну служби (25 років), знаходячись в будь-якому з вказаних станів, і одночасно бути завжди готовими до миттєвого ефективного виконання будь-яких комутаційних операцій, часто після тривалого перебування в нерухомому стані. Звідси витікає, що вони повинні мати дуже високий коефіцієнт готовності : при малій тривалості процесів комутації (декілька хвилин в рік) має бути забезпечена постійна готовність до здійснення комутацій.

Розглянемо процеси, які протікають у вимикачі при його експлуатації. При передачі електрики рухаються заряджені частки - електрони, які передають енергію по струмопроводам. Для припинення протікання електричного струму створюють розрив в схемі електричного ланцюга. Але при цьому продовжують діяти потужні інерційні сили, енергії яких необхідно протистояти. Річ у тому, що миттєво відключити електричний ланцюг і відвести його контакти на безпечну відстань неможливо навіть при потужному вибуху, оскільки у момент розмикання ланцюга потік електронів продовжує рух за інерцією.

Спеціальні технічні конструкції, звані вимикачами навантаження, створені для припинення дії інерційних сил електричного поля, обмеження і ліквідації протікання струму. Спрощено стадії роботи такого вимикача показані на рис.5.1. Коли вимикач включений (рис 5.1 а), то через нього протікає струм. З початком роз'єднання контактів (рис. 5.1 б) між ними з'являється електрична дуга. Причини її утворення не лише пов'язані з силами інерції, але і з виділенням значної кількості теплоти, що виникає при розриві ланцюга із-за різкого збільшення опору ділянки відключення. Підвищена температура активізує рух електронів, сприяє їх прольоту через проміжок, який утворився. Електрони, що розганяються в електричному полі, потрапляють в зустрічні атоми повітря,

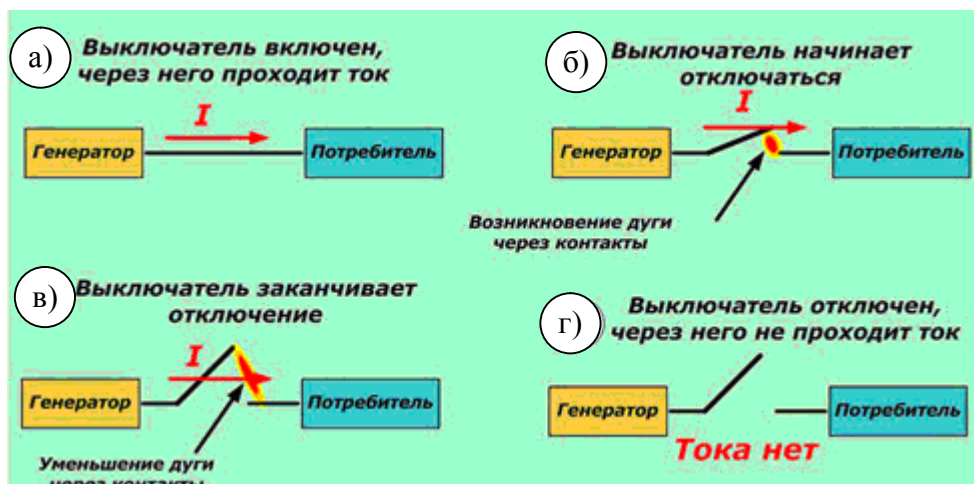


Рис. 5.1 Етапи роботи високовольтного вимикача

передаючи їм свою кінетичну енергію. При цьому виникає розподіл нейтральних атомів повітря на позитивні і негативні іони, які починають рухатися під дією прикладеного до мережі потенціалу, утворюють іонізаційний канал. У такий спосіб утворюється ствол дуги і перехід молекул повітря в стан розігрітої плазми, що проводить струм. Із збільшенням дистанції у контактів (рис 5.1 в), які поступово розводяться, дуга розтягується, а її температура, під впливом відведення тепла в довкілля і начала зворотних процесів деіонізації, знижується. У кінцевому положенні вимикача (рис. 5.1 г) електрична дуга обривається і струм припиняється.

Наведений приклад лише приблизно пояснюють принципи і етапи роботи вимикача навантаження. Насправді процеси в ньому описуються складнішими технологіями. З сказаного слідує, що дуже важливою частиною вимикача є процес гасіння дуги. Для гасіння дуги високовольтного розряду найчастіше використовується спосіб переміщення її в інертне середовище, що має ізоляційні властивості. Це різко знижує збільшення іонізаційного шару, перешкоджає інтенсивності дугоутворення. В наступний час як ізоляційні речовини в основному використовують:

- масло – масляні вимикачі;
- стисле повітря – повітряні вимикачі;
- вакуум – вакуумні вимикачі;
- гексафторид сірки (елегаз, SF_6) – елегазові (або .SF) вимикачі

Автоматичні вимикачі, також виконують деякими форми електричного захисту, і застосовуються, щоб забезпечувати автоматичне відключення частин силової системи в умовах короткого замикання. Хоча це їх і основна роль, вони повинні також задовольняти наступним вимогам:

- діяти як електричний роз'єднувач у відкритому стані.
- тривало нести навантаження аж до номінального струму.
- періодично включати і відключати струм повного навантаження.
- зрідка витримувати і відключати струми короткого замикання впродовж встановленого максимального часу (звичайно 3 секунди)

- автоматичні вимикачі часто використовуються як засіб забезпечення електричного розділення (розчиплювач) у висунутому стані..

Хоча ізолююче середовище і методи гасіння дуги можуть мінятися, загальні принципи роботи кожного типу дуже близькі, оскільки усі автоматичні вимикачі містять певну кількість таких компонентів як:

- контакти - фіксовані і рухливі;
- механізми замикання та розмикання;
- ізолююче середовище і дугогасильний пристрій.

До основних номінальних параметрів вимикачів відповідно до рекомендацій Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК) відносяться:

- номінальна напруга $U_{ном}$;
- найбільша робоча напруга $U_{н.р}$;
- номінальний рівень ізоляції в кіловольтах;
- номінальна частота $f_{ном}$;
- номінальний струм $I_{ном}$;
- номінальний струм відключення $I_{о.ном}$;
- номінальний струм включення $I_{в.ном}$;

Номінальна напруга $U_{ном}$ (лінійне) - це базисна напруга із стандартизованого ряду напруги, що визначає рівень ізоляції мережі і електричного устаткування. Дійсна напруга в різних точках системи може відрізнятися від номінального, проте вони не повинні перевищувати найбільшу робочу напругу (номінальна напруга по МЕК), встановлену для тривалої роботи (таблиця. 5.6).

Табл.5.6 Клас номінальних напруг автоматичних вимикачів

Номінальна міжфазна (лінійна) напруга, діюче значення, кВ	Найбільша робоча напруга (номінальна напруга по МЕК), діюче значення, кВ
3	3,6
6	7,2
10	12
15	17,5
20	24
35	40,5
110	126
150	172
220	252
330	363
500	525
750	787
1150	1200

Номінальний рівень ізоляції вимикача характеризується значеннями випробувальної напруги, що впливає на основну ізоляцію вимикача.

Номінальний струм - діюче значення найбільшого струму, допустимого за умовами нагріву струмопровідних частин вимикача в тривалому режимі, що набуває наступних значень: 200; 400; 600; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 2500; 3150; 4000; 5000; 6300; 8000; 10000; 12 500; 16 000; 20 000; 25 000; 31 500 А.

Номинальний струм відключення $I_{o.ном}$, який може відключити вимикач при найбільшій робочій напрузі і нормованих умовах відновлення напруги. Струм відключення характеризується діючим значенням його періодичної складової $I_{o.п}$, віднесеної до моменту виникнення дуги (момент розмикання дугогасильних контактів) і званою номінальним струмом відключення $I_{o.ном}$ (2,5; 3,2; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 35,5; 40; 45; 50; 56; 63; 71; 80; 90; 100; 112; 125; 140; 160; 180; 200; 224; 250 кА),

Номинальний струм включення $I_{в.ном}$ - найбільший струм, який вимикач може включити при найбільшій робочій напрузі. При виникненні короткого замикання в ланцюзі за час близько 10 мс струм досягає свого максимального значення, званого ударним струмом короткого замикання. Тому номінальний струм включення має бути не менш ударного струму короткого замикання з умови можливості включення на існуюче коротке замикання в ланцюзі.

Розглянемо особливості конструкцій основних типів автоматичних вимикачів.

5.2.1.2 Автоматичні вакуумні вимикачі.

Останніми роками відзначається інтенсивне використання вакуумних комутаторів в області напруги 6-35 кВ для створення вакуумних контакторів, вимикачів навантаження, вакуумних вимикачів для головного розподільного щита. Це пояснюється рядом безперечних переваг:

- висока швидкодія – загальний час роботи від початку розриву ланцюга до гасіння дуги не перевищує 40 мілісекунд, тобто два періоди синусоїди.
- повна вибухово -- і пожежебезпечність, що забезпечується відсутністю пожеже небезпечних речовин (наприклад масла);

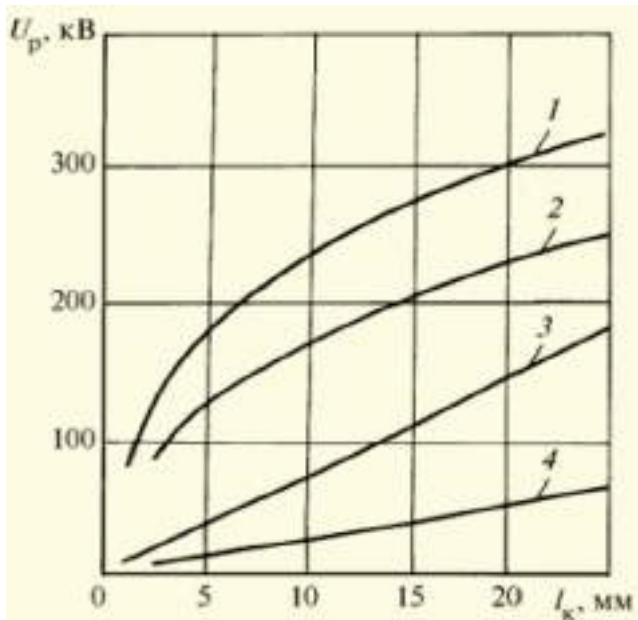


Рис. 5.2 Залежність напруги від відстані між електродами в однорідному електричному полі для різних середовищ:
1 – вакуум; 2 – масло; 3 – елегаз; 4 - повітря

- екологічна чистота – оскільки вакуум це чисте екологічне середовище;
- широкий діапазон температури (від +200 до - 70°C);
- надійність, мінімальні експлуатаційні витрати, мінімальні габаритні розміри;
- підвищена стійкість до ударних і вібраційних навантажень,
- висока зносостійкість при комутації номінальних струмів і струмів навантаження,
- довільне робоче положення вакуумного дугогасильного пристрою.

Але практична реалізація

вакуумних вимикачів стала можлива лише після появи технічних можливостей - створення вакуумне чистих сплавів металів і отримання високого вакууму до $1,3 \cdot 10^{-5}$ Па. На рис. 5.2 показана залежність напруги розряду в однорідному полі від відстані між контактами для різних ізоляційних середовищ.

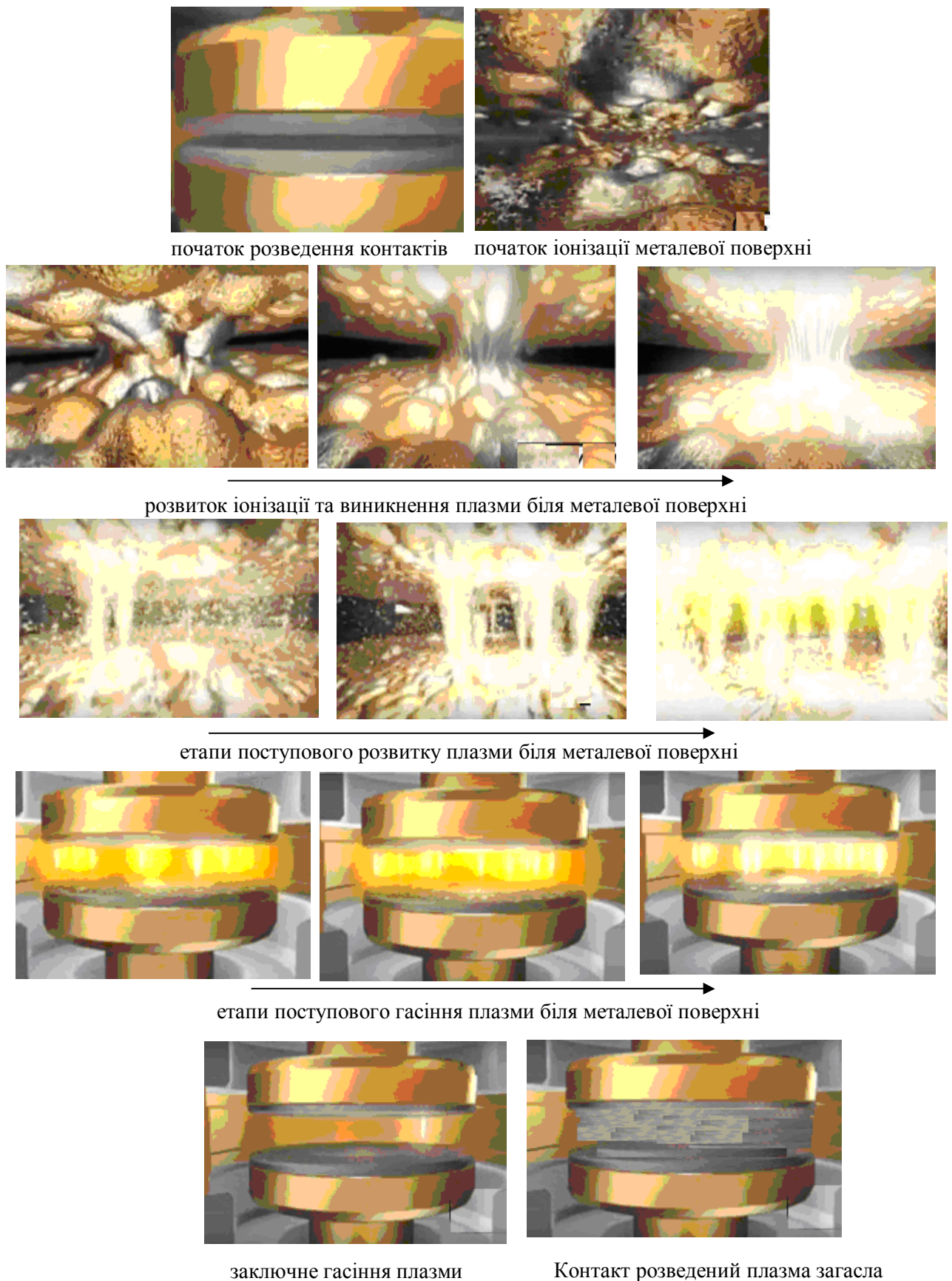


Рис. 5.3 Етапи виникнення та гасіння дуги у вакуумному високовольтному вимикачі

Умови існування і гасіння дуги у вакуумі мають свої особливості. Обидві контактні пластини працюють в середовищі вакууму, утвореного за рахунок відкачування газів з посудини дугогасильної камери.. При цьому створюється висока електрична міцність, що характеризується посиленими діелектричними властивостями. З початком руху приводом контактів на роз'єднання між ними з'являється проміжок, що відразу містить вакуум (рис.5.3). Усередині нього починається процес випару нагрітого металу контактних майданчиків. Через ці пари продовжує протікати струм навантаження. Він ініціює утворення додаткових електричних розрядів, що створюють дугу в середовищі вакууму, що продовжує розвиватися за рахунок випару і відриву парів металу. Під дією прикладеної різниці потенціалів іонізовані іони рухаються в певному напрямі, створюючи плазму. У її середовищі триває протікання електричного струму, йде подальша іонізація. Оскільки вимикач працює із змінним електричним струмом, то його напрям впродовж кожного напівперіоду змінюється на протилежний.

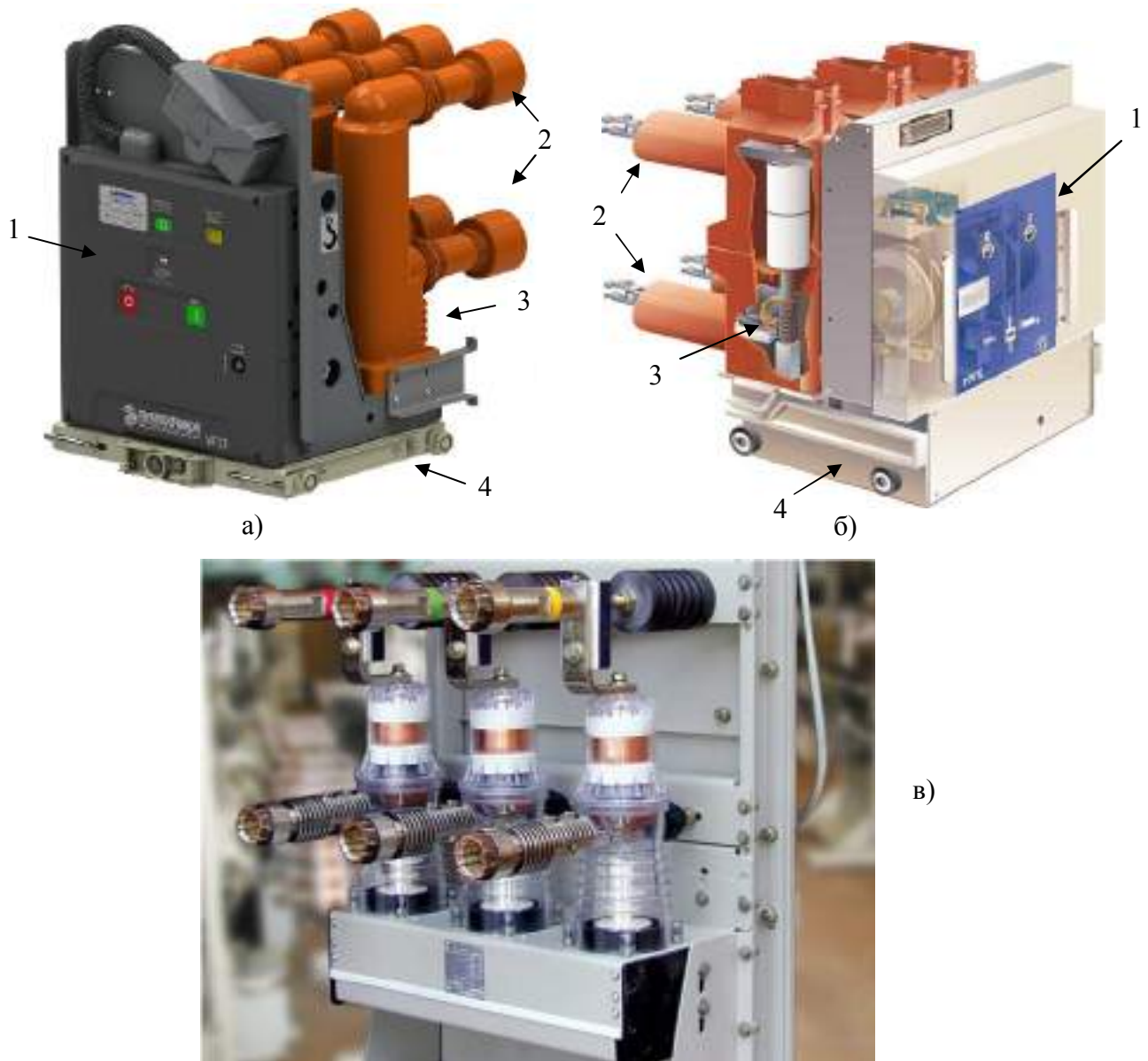


Рис. 5.4 Типові конструкції високовольтних автоматичних вимикачів:
а – для встановлення в шафах розподільних щитів; б - для відкритих розподільних щитів

Під час переходу синусоїди через нуль струм відсутній. За рахунок цього дуга різко гасне і обривається, а відторгнуті іони металу припиняють виділятися і за $7\div 10$ мікросекунд повністю і осідають на найближчих поверхнях контактів або інших частинах дугогасильної камери. У цей момент електрична міцність проміжку між силовими контактами, яка заповнена вакуумом, практично миттєво відновлюється, чим забезпечується остаточне відключення струму навантаження. У наступному напівперіоді синусоїди електрична дуга виникнути вже не може. Таким чином, для припинення дії електричної дуги в середовищі вакууму при розмиканні силових контактів досить змінному струму змінити свій напрям. Але із-за великої електричної міцності вакууму гасіння дуги може статися до переходу струму через нуль, це явище називають зрізом струму. Зріз струму негативно впливає на мережу, оскільки викликає комутаційні перенапруження, які можуть досягати величезних величин.

Вакуумні вимикачі конструктивно розроблялися спочатку як пристрій, вживаний тільки в шафах розподільних щитів (рис.5.4 а, б). Нині вони використовуються і для відкритих розподільних пристроїв (рис.5.4 в), але на суднах практично завжди використовують перший тип конструкції. На рис.5.5 наведено розміщення вакуумного вимикача видатного типу та висувного типу в односторонньому шафі розподільного обладнання..

Основні елементи конструкції такого вакуумного вимикача наступні

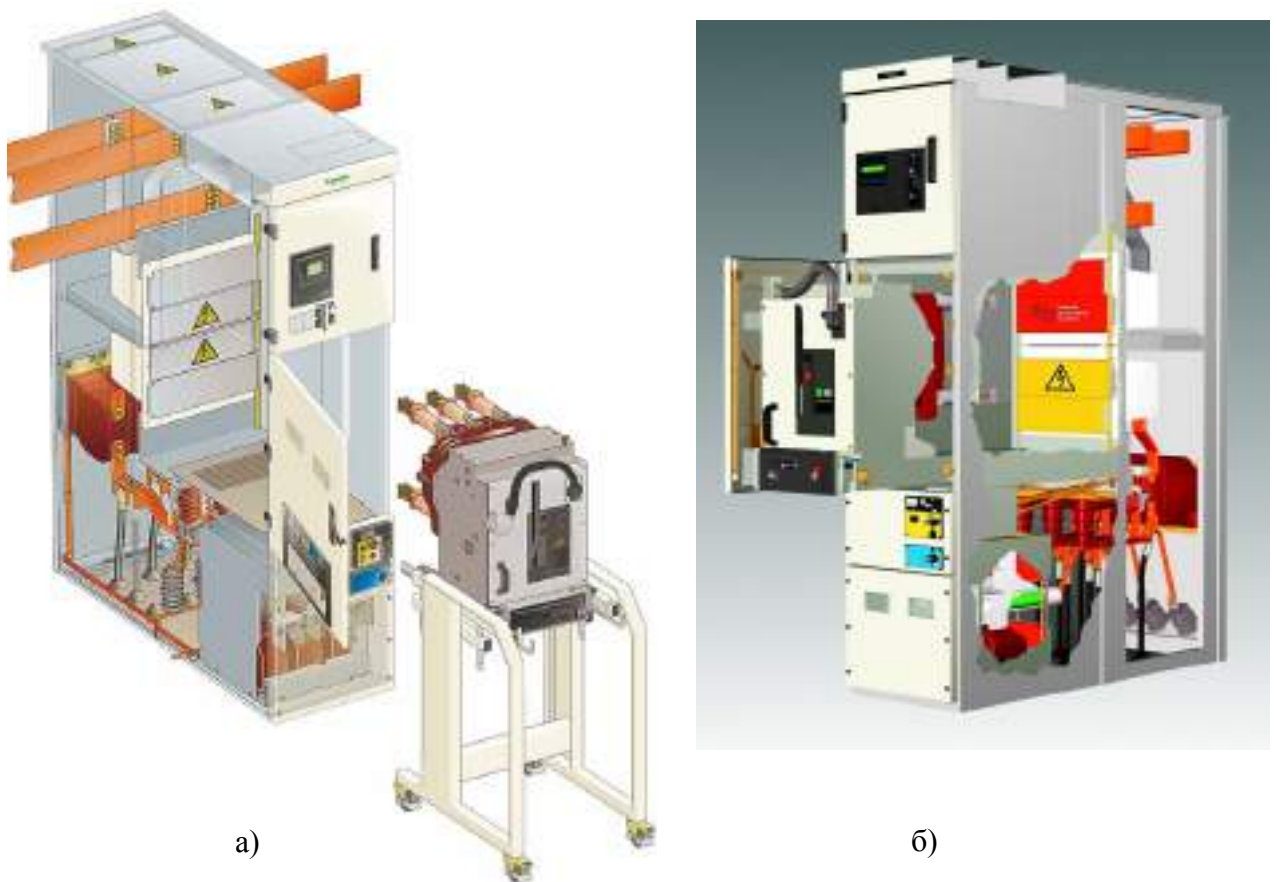


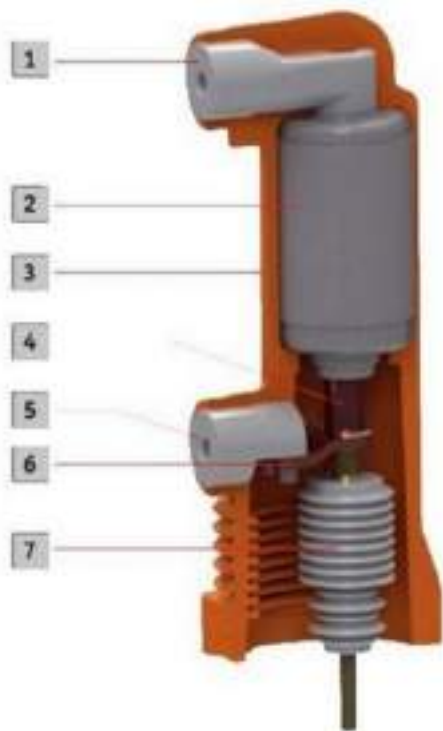
Рис.5.5 Розташування високовольтного вакуумного автоматичного вимикача у шафі одностороннього розподільного обладнання
а – вискатного типу; б – висувного типу

(рис.5.4 а):

1 - Корпус з міцного металевого матеріалу, усередині якого встановлений привід включення і відключення (на рис.5.4 а він пружинний);

2 - Три полюси струмопровідних частин, які призначені для підключення до мережі і для від'єднання від неї при експлуатації в контрольне, робоче і викочене положення;

3 – Високовольтна частина у литому діелектричному корпусі, що містить силіконові і епоксидні смоли, з вакуумною дугогасильною камерою;



4 – Теліжка для переміщення усередині комірki розподільного щита (цей механізм часто у різних виробників різний).

Електрична основна високовольтна частина вимикача розділена між фазами і містить наступні елементи (рис.5.6):

1 - верхній струмопровідний вивід;

2 - дугогасильна камера, що містить вакуум;

3 - діелектричний корпус полюса;

4 - рухлива частина контактної системи;

5 - нижній струмопровідний вивід;

6 - гнучкий елемент струмопровідної шини;

7 - спеціальна тяга, обладнана міцним ізолятором.

Рис. 5.6 Конструкція високовольтної частина вакуумних вимикачів:

У свою чергу, сама дугогасильна камера є теж дуже важливим хоч і не розбірним елементом, часто у разі несправності вона не ремонтуються, а замінюються новою. Ось основні частини і механізми дугогасильної камери (рис.5.7):



Рис. 5.7 Конструкція дугогасильної камери високовольтних вакуумних

механізми дугогасильної камери (рис.5.7):

1 - Вивід нерухомого силового контакту;

2 - нерухомий силовий контакт;

3 - рухливий силовий контакт;

4 - екрануючий механізм, що знижує перешкоди при комутації. Металеві екрани запобігають проникненню тепла і металевої пари із зони дуги до ізолюючого корпусу. Вони також управляють електричним полем, коли контакти розмикаються, і між ними з'являється напруга.;

5 - керамічний ізоляційний корпус;

6 - Сильфон, що зберігає герметичність під час руху контакту. Є дві форми сильфонів. Одна є гофрованою тонкостінною трубою. Вона має невеликий діаметр і мінімальну кількість точок з'єднань. Друга зібрана з тонких загострених

шайб, зварених разом по внутрішніх і зовнішніх краях. Обое має малу довжину і високу рухливість при скороченні.

7 - Вивід рухливого елементу контактної системи.

Оскільки на працездатність, довговічність та надійність високовольтних вакуумних вимикачів найбільш впливають контакти, то до матеріалу контактів та їх формі надаються значні вимоги.

Контактні матеріали повинні мати наступні характеристики:

- хороша механічна міцність і електропровідність;
- хороша тепловіддача, щоб сприяти швидкому охолодженню джерела дуги;
- задовільний випар металу при низькоамперної дузі для управління розщеплюванням струму;
- обмеження металевих випарів і термічної емісії від високоамперної дуги, щоб відновити напругу при нульовому струмі;
- слабка приварюємість і відсутність властивостей прилипання в холодному стані контактуючих поверхонь, щоб забезпечити їх легке і достатньо розділення;
- контактні поверхні повинні мати дуже невелику шорохуватість, щоб уникнути контактної проміжки і, як наслідок, електричного опору між контактами;
- низька і рівномірна ерозія, щоб забезпечити довговічність.

Оскільки в природі немає якого-небудь одного металу з переліченими вище характеристиками, то деталі виготовляють з різних сумішей, сплавів і напилень, металокерамічних матриць на тугоплавкій пористій основі, просоченій м'яким металом, такими як мідь і хром. Найбільше застосування в якості контактних матеріалів у високовольтних вакуумних вимикачах знайшли мідно-вісмутові, мідно-хромові і мідно-берилієві сплави.

Прямі дископодібні контакти, які використовують зазвичай в контакторах, витримують сили до 10 кА. Дифузія залишає зазвичай катодні плями, і дуга може бути легко погашена. Пік струму дуги понад 10 кА концентрується однією плямою на поверхні контакту, що викликає локальне перегрівання, і не дає можливості досить швидкого охолодження, при падіння струму до нуля і, тим самим, не запобігає повторному утворенню дуги. Збільшення розміру контакту без інших змін малоефективне, оскільки перегрівання як і раніше є локальним. Якщо дуга пересуватиметься по контактній поверхні без дифузії, то локального перегрівання вдасться уникнути. Тому збільшений розмір контактів може збільшити розривну здатність.

Найбільш широкого поширення в високовольтних вимикачах набули два різновиди контактів: контактна система типу **"спіральна пелюстка"**, що змушувала стислу дугу безупинно обертатися по поверхні електродів, і контактна система **чашоподібного типу**, яка взагалі перешкоджала утворенню стислої локалізованої дуги, що залишається завдяки цьому упродовж усього процесу дугогасіння в дифузному стані.

Контакти типу "спіральна пелюстка". Принципове конструктивне рішення контактів цього типу показане на рис.. 5.8. Контакти мають дискову форму з малим конусом з боку контактної поверхні або з кільцевим виступом. За допомогою цих виступів здійснюється зіткнення контактів у включеному положенні, і якраз через них і протікає струм навантаження. Своїми

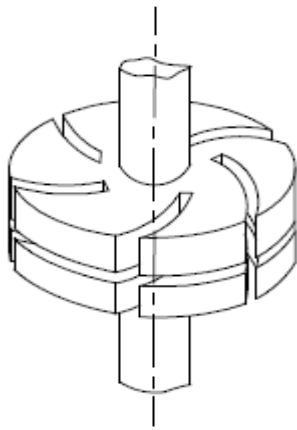


Рис. 5.8 Контакти типу "спіральна пелюстка"

периферійними ділянками спіральні контакти навіть в замкнутому стані не стикаються. Наскрізними спіралеподібними прорізами ці периферійні ділянки розрізали на декілька пелюсток, які з'єднані з іншим контактом тільки в його центральній частині. У кожній контактній парі напрям спіралеподібних прорізів співпадає, як це видно з рис. 5.8.

Робота цих контактів відбувається таким чином: якщо струм, який відключається вимикачем, відносно невеликий, так що дуга, яка утворюється, може знаходитися в дифузному стані, то розмикання контактів веде до встановлення звичайного процесу відключення, пов'язаного із стяганням ліній струму до одній або декількох контактних майданчиків, що розмикаються останніми. Одночасно відбувається формування в проміжку між контактами струмопровідних містків, які розходяться, з розплавленого металу, що супроводжується потім їх розривом і виникненням там електричної дуги, як це має місце і в звичайних комутуючих контактах. Виникла між контактами дуга потім швидко трансформується в дифузну дугу з декількома одночасно функціонуючими катодними плямами, що переміщаються безладно по поверхні контактів. Деякі з цих плям в процесі свого руху доходять до краю контактної поверхні і, зайшовши за нього, гаснуть, а інші, що продовжують ще горіти, навпаки, розщеплюються надвоє, так що сумарне число емітуючих плям залишається пропорційним струму, що протікає в даний момент через вимикач. Катодні плями прагнуть поширитися по поверхні катодного диска, займаючи або усієї її, або, принаймні, значну її частину.

Зовсім по-іншому протікає відключення при великих струмах, коли дуга у вакуумі існує вже в стислому вигляді. Після розриву одного або декількох містків з розплавленого металу в проміжку утворюється одноканальна дуга в стислому вигляді. Окремі катодні плями, відштовхуючись один від одного, увесь час покидають зону дуги, але вийшовши за неї, негайно гаснуть, оскільки пов'язаний з ними плазмовий стовп під дією магнітних сил притягується назад, до центрального стовпа дуги. Оскільки зіткнення контактів у включеному положенні відбувається не в їх геометричному центрі, а по кільцевому виступу, то після їх розмикання і утворення одностовольної дуги створюється пітлеподібний контур струму, внаслідок чого на неї діятимуть електродинамічні сили, спрямовані радикально від осі контактів убік, під дією яких дуга прагнуче вийти за контактний виступ, зміщуючись до краю контактних дисків і вигинаючись назовні, точно так, як і вона поводить, коли доходить до периферійної зони лінійних контактів. Але в даному випадку із-за наявності спіралеподібних прорізів в проміжку між контактами виникає радіальне магнітне поле, внаслідок чого на дугу, окрім відцентрових, діятимуть тангенціальні зусилля, прагнучі перемістити її по колу у напрямі вигину спіральних прорізів. Ефективність обертання дуги по поверхні таких контактів

залежить від кривизни спіралі, причому чим більше кривизна спіралі, тим вище ефективність роботи таких контактів.

Стисла дуга викликає інтенсивний локальний нагрів електродів в околиці її опорних точок. Але тепер уже дуга не залишається в нерухомому стані скільки-небудь тривалий час в якомусь одному місці, а безперервно переміщається по поверхні контактів, і тому тепло від неї не устигає проникнути досить глибоко в метал. Внаслідок цього постійна часу охолодження зони контакту, у якої сильно нагрітим виявляється лише її поверхневий шар, складає зазвичай декілька сотень мікросекунд. Таким чином, до моменту, коли струм дуги наближається до нуля, стисла одноканальна дуга трансформується у свою дифузну модифікацію. Практично цей перехід одного різновиду в іншу здійснюється, коли миттєве значення струму складає дещо кілоампер, що при відключенні струмів короткого замикання відбувається за 400 . 500 мкс до нуля струму залежно від параметрів ланцюга комутації і змісту аперіодичної складової. Цей час виявляється достатнім для того, щоб сильно нагрітий дугою поверхневий шар контактів встиг охолотитися до температури, при якій тиск пари металу в дуговому проміжку достатній мало, що призводить до формування остаточної стадії відключення дуги в дифузному стані.

Усі існуючі модифікації контакті типу "спіральна пелюстка" прагнуть змістити дугу з центральної зони контакту в периферійну.

Чашоподібні контакти. Це ще один різновид контактних систем, що застосовуються у вакуумних вимикачах (рис.5.9). Тут контакти виконані у вигляді чаші з товстими стінками, прикріпленої своїм денцем до контактоутримувачу. У включеному положенні контакт відбувається по відкритих торцевих поверхнях чаші. У бічних стінках чаші передбачені похилі

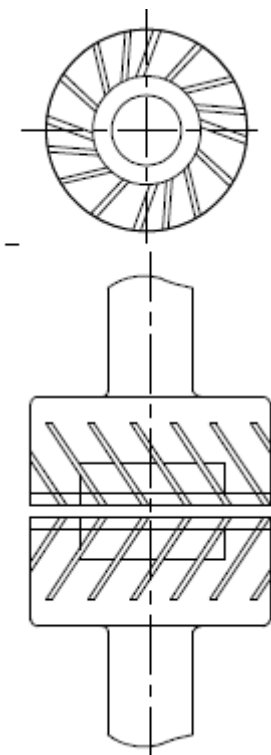


Рис. 5.9 Чашоподібні контакти

прорізи. У контактних елементах однієї контактної пари прорізу нахилені в протилежні сторони. При розмиканні контактів між ними утворюються містки з розплавленого металу, причому число цих містків залежить від струму, що відключається. Після розриву містків на їхньому місці виникає паралельні електричні дуги, що горять одночасно в багатьох місцях по колу контакту. Перехід від численних містків до таких же численних дуг обумовлений хоча і невеликою, але цілком визначеною індуктивністю окремих пальців контактної системи. Одночасно з дугами там з'являються і радіальні магнітні поля, що наводяться струмом, що протікає через похилі пальці контактів. Під дією цих полів плазмовий стовп дуги вимушений переміщатися по колу в проміжку між торцями контактів в напрямі, визначуваному правилом лівої руки, тоді як катодні плями на поверхні контактів повільно рухаються у зворотному напрямі. У результаті в проміжку утворюється як би порожниста кільцеподібна дуга, що знаходиться в дифузному стані, яка не в змозі трансформуватися у свій різновид у вигляді стислої дуги.

Механізми включення/відключення.

Незалежно від типу ізолюючого середовища, використовуваного усередині автоматичного вимикача, потрібно наявність механізму для замикання його контактів. Використання автоматичного вимикача з ручним залежним приводом є небажаним. Потужність, яка потрібна для включення/виключення, визначається силою інерції автомата, коефіцієнтом тертя пов'язаних матеріалів, номінальним струмом, але особливо важливо значенням струмів короткого замикання. В порядку мінімізації дуги при закритті або відкритті дуже важливо, щоб контакти комутували за найкоротший по можливості час, що у ручному режимі здійснити важко.

Енергія включення може забезпечуватися від гідравлічного, пневматичного або частіше в промислових високовольних автоматичних вимикачах від соленоїда або пружини. У останньому випадку автоматичний вимикач може бути зведений ручним способом або з використанням електромотора.

На рис.5.10 наведена конструкція механізму включення, яка заснована на ручному взводі пружини.

Така конструкція має отвір 6 для ручного, або моторного взводу пружини, індикатор взведення пружини 2, індикатор стану вимикача 3 (включено/відключено), кнопку включення 5 та кнопку відключення 4.

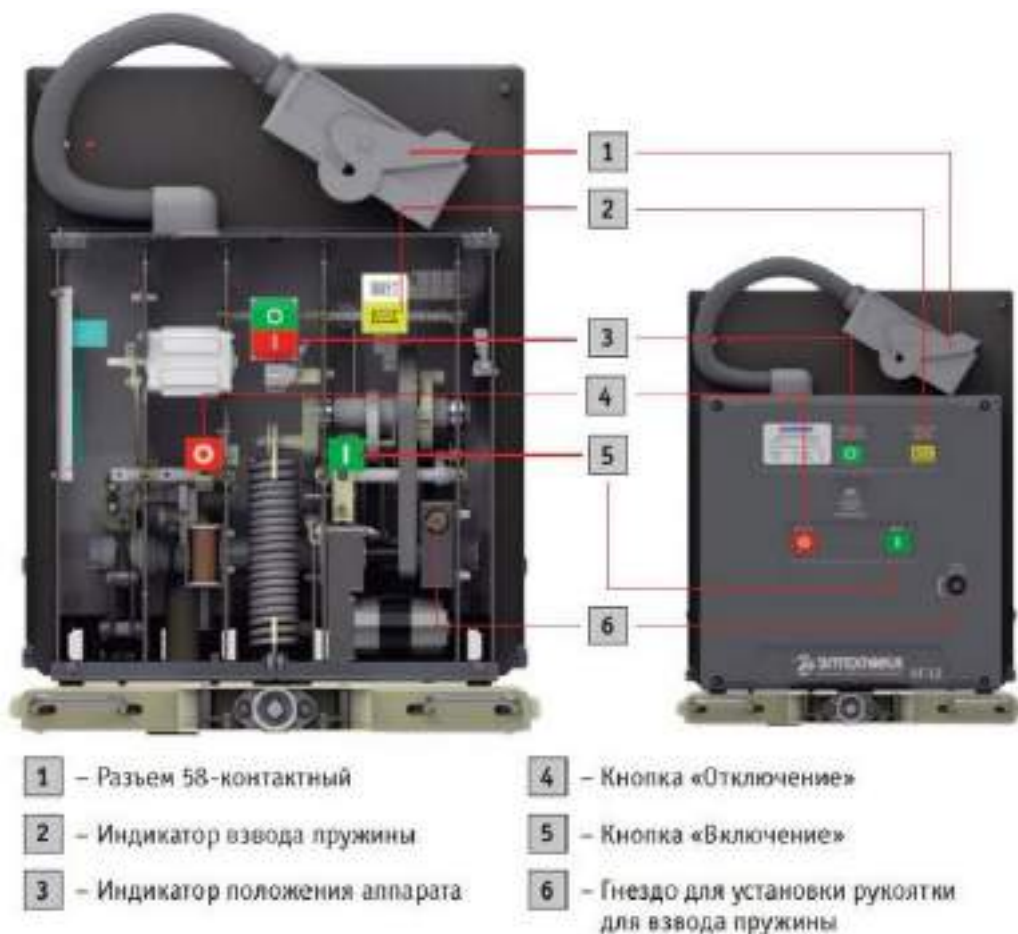


Рис. 5.10 Конструкція високовольного вакуумного вимикача з механізмом з ручним взводом пружини

Для підвищення надійності і запобігання втраті живлячої напруги при включенні автоматичного вимикача котушка механізму взводу зазвичай живиться від батареї. Це збільшує вартість вимикача і вимагає додаткового обслуговування. При частих операціях включення./відключення. чи частих комутаціях таких, як при роботі з електродвигунами являється ідеальним соленоїдний вмикальний механізм. Механізм з ручним взводом пружини не вимагає установки батареї високої ємності, але не зручний при частих операціях і для дистанційного керування.

Моторизована пружина є хорошим компромісом між ручною пружиною і соленоїдним механізмом. Як тільки вимикач замикається, він підтримується в замкнутому стані за допомогою клямки або вилки, яка дозволяє відключатися від енергії джерела замикання. Є нормальною практикою для роботи автомата містити в собі зведену пружину для відключення. У відповідь на сигнал, що прийшов, від системи управління або захисту відключаюча котушка або соленоїд отримують живлення і впливають на клямку або вилку. Енергія, що зберігається у відключаючій пружині, діє на швидке відключення автомату. Швидкість відключення визначається певною кількістю чинників, включаючи конструкцію вузлів і використовувані матеріали. На додаток до цього основну роль грає струм, що розривається.

Цілком зрозуміло, що механізм включення/відключення є складним і, якщо його обслуговування не проводиться згідно з вимогами виробника, то вони не працюватимуть ефективно, в результаті тривала тривалість дуги може викликати серйозні наслідки.

Вимикач управляється місцевим або дистанційним способом. У аварійних режимах відключається від релейного захисту або від протиаварійної автоматики (подається живлення на електромагніт відключення і струмопровідні контакти розмикаються).

Недоліки вакуумних високовольтних автоматичних вимикачів наступні:

- невеликий ресурс під час струмів короткого замикання;
- є вірогідність появи комутаційних перенапружень при відключенні малих струмів навантаження;
- досить висока вартість як усього пристрою, так і комплектуючих.

5.2.1.3 Автоматичні маломасляні вимикачі.

Як слідує з рис.5.2 найбільшою електричною міцністю після вакууму слідує масло. У дугогасильних пристроях традиційних масляних вимикачів гасіння дуги здійснюється шляхом ефективного її охолодження в потоці газопарової суміші, що виробляється дугою в результаті розкладання і випару масла. Залежно від призначення масла можна виділити дві основні групи масляних вимикачів:

- бакові (багатооб'ємні) масляні вимикачі, в яких масло використовується для гасіння і ізоляції токоведущих частин від заземленого бака;

- маломасляні (малооб'ємні) масляні вимикачі, в яких масло використовується тільки для гасіння дуги і ізоляції між розімкненими контактами одного полюса.

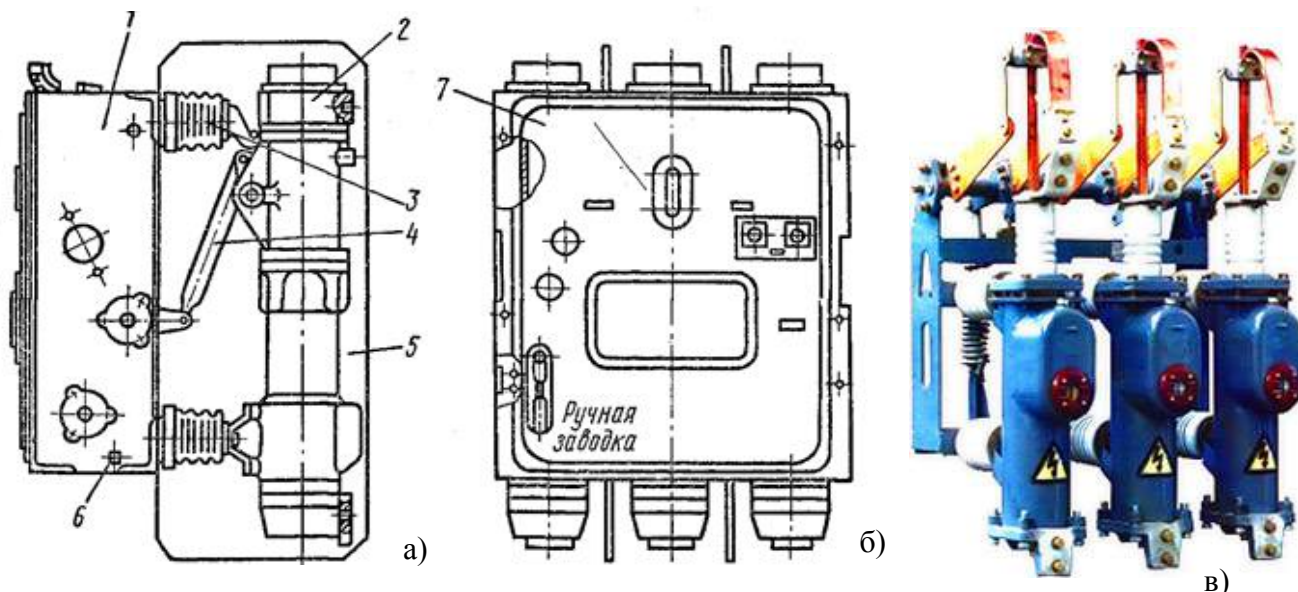


Рис. 5.11 Автоматичний маломасляний вимикач типу ВМП-10К:

а – вигляд збоку; б – вигляд з переду; в – вигляд без пружного приводу;

1 – рама; 2 – полюс; 3 – ізолятори; 4 – загальний важіль вимикача; 5- ізолюючі пластини (необов'язково); 6 – кріплення приводу; 7 – лицева панель

Розглянемо конструкцію та принцип дії маломасляного вимикача на прикладі вимикача типу ВМП-10К, які призначені для роботи у комірках комплектних розподільних комплексів і які призначені для перемикання наруги до 10 кВ зі струмами до 1500 А та струмом відключення до 20 кА та який має пружний привід (рис. 5.11). Три полюси 2 вимикача змонтовані на зварній рамі 1 за допомогою ізоляторів 3. Усередині рами розташовані загальний приводний вал 4 з важелями, відключаючі пружини, пружинний і масляні демпфери. З переду є отвір для приведення пружного механізму в робочий стан, кнопка включення/відключення, індикатори стану вимикача та стану пружини.

На рис.. 5.12 представлена одна фаза (полюс) маломасляного вимикача типу ВК-10.. Полюс виконаний у вигляді ізолюючого циліндра 22, на кінцях якого заармировані металеві фланці. На верхньому фланці укріплений корпус 19 з рухливим механізмом 20, струмопровідним стрижнем 21, роликовим токоємним пристроєм 36 і маслорозподільником. 14. До нижнього фланця 30 кріпиться кришка з розетковим контактом 29 і показчиком рівня масла 10.

Струмопровідний ланцюг вимикача складається з верхнього контактного виводу 35, направляючих стержнів 21, струмознімальних роликів 36, струмопровідного стержня 33, розеткового контакту 29 і нижнього контактного виводу 28. Перехід струму від рухливого контакту 33 до направляючих стержнів 21 відбувається через рухливі кінцеві ролики 36. Вони зібрані попарно і притискаються пружинами до рухливого контакту 33 і направляючих стержнів 21. Величина контактного тиску не регулюється. Поверхні направляючих стержнів, роликів, рухливого контакту і ламелей розеткових контактів 29 для

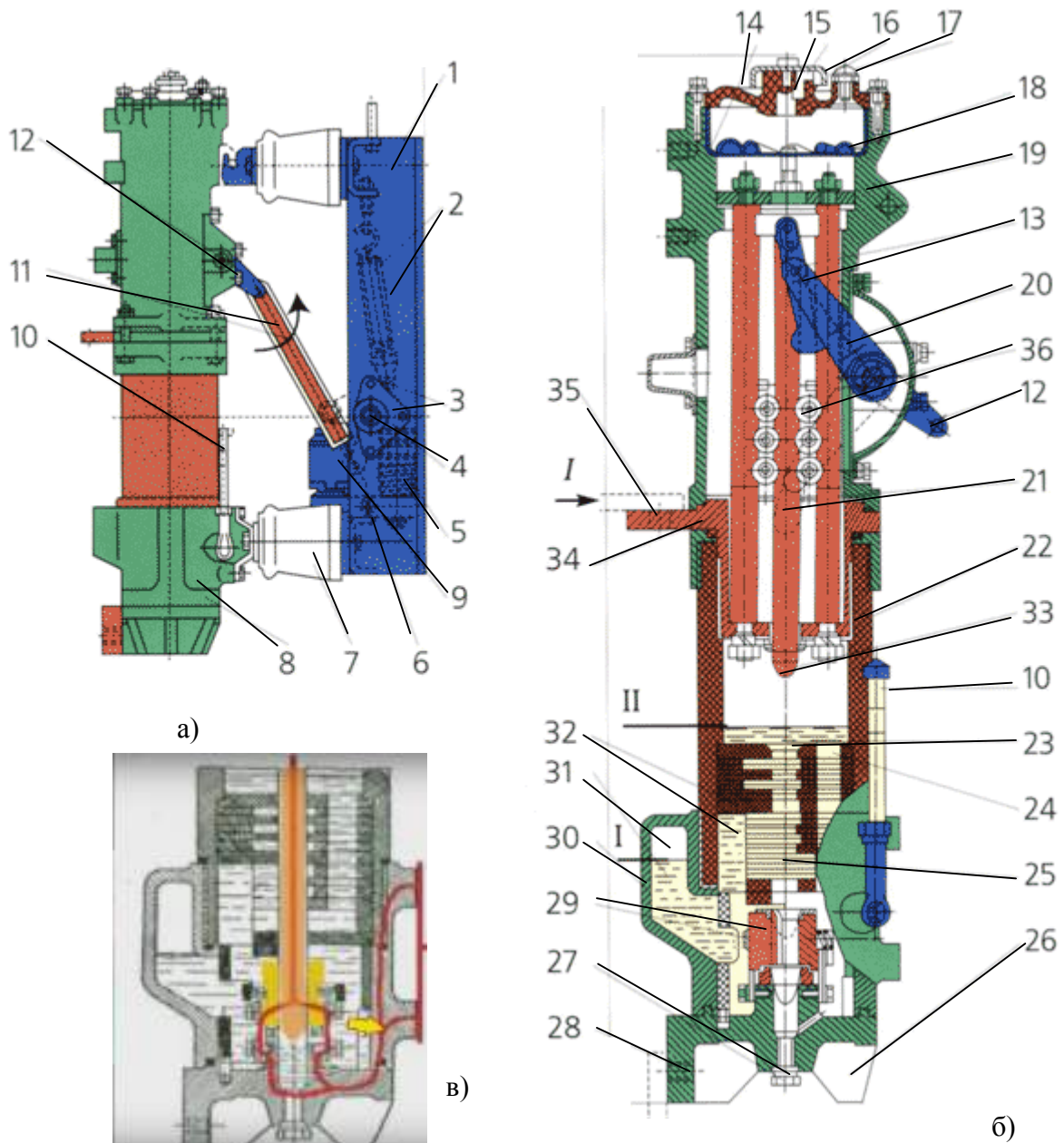


Рис. 5.12 Конструкція одного полюсу автоматичного маломасляного вимикача типу ВМП-10К:

- а – вигляд збоку; б – розріз полюсу; в – положення і проходження струму в замкнутому стані
- 1 – сталева рама; 2 – пружина відключення; 3 – двуплічний важіль; 4 – вал вимикача;
 5 – пружний демпфер; 6 – болт заземлення; 7 – опорний ізолятор; 8 - бачок фази;
 9 - масляний демпфер; 10 - індикатор рівня масла; 11 - ізолююча тяга; 12 - важіль;
 13 - випрямляючий механізм; 14 - масловідділювач; 15 - канал для виходу газу;
 16 - кришка; 17 - пробка для наливу масла; 18 - отвори масловідділювача; 19 - корпус;
 20 - важіль; 21 - контактний стрижень; 22 - склопоксидний циліндр; 23 - центральний канал камери;
 24 - боковий канал камери; 25 - дугогасильна камера; 26 - нижня кришка полюсу;
 27 - пробка для спуску масла; 28 - шина відводу; 29 - нерухомий контакт (контактна розетка);
 30 - нижній фланець; 31 - буферний простір; 32 - масляний карман; 33 - рухомий контакт;
 34 - верхній вивід; 35 - вхідна шина; 36 - ролики для знімання струму ;

зменшення перехідного опору посріблені. Для підвищення стійкості контактів до дії електричної дуги і збільшення терміну служби знімний наконечник

рухливого контакту 33 і кінці ламелей розеткового контакту фанеровані дугостійкою металокерамікою. Ламелі розеткового контакту через гнучкі зв'язки приєднані до нижньої кришки, які одночасно служать і контактним виводом. Натиснення ламелей на струмопровідний стрижень 33 створюється пружинами, що спираються на загальне кільце з латуні.

Проходження струму через вимикач у замкнутому стані показано на рис. 5.12 в.

Масляний демпфер 9 призначений для пом'якшення удару при відключенні вимикача. Пружинний буфер 5 призначений для пом'якшення удару при включенні мало масляного вимикача, крім того його пружина збільшує зусилля при відключенні вимикача і підвищує швидкість розмикання контактів. У середині ізолюючого циліндра над розетковим контактом встановлена дугогасильна камера 25.

При гасінні електричної дуги трансформаторне масло, що викидається з дугогасильної камери спрямовується вгору. Частина масла доходить до масловіддільника ударяється об нього і стікає вниз. Гази проходять через отвори в масловіддільнику і далі через канал в кришці назовні. Кришка 16 виготовляється з ізоляційного матеріалу, в ній є маслоналивний отвір закрите різьбовою пробкою 17. На нижньому фланці полюса мало масляного вимикача є вказівник рівня масла 10, призначений для контролю за рівнем масла в полюсі. На скляній трубці дві відмітки в межах між якими повинен знаходитися рівень масла. Конструкція нижнього нерухомого контакту наведена на рис. 5.13.

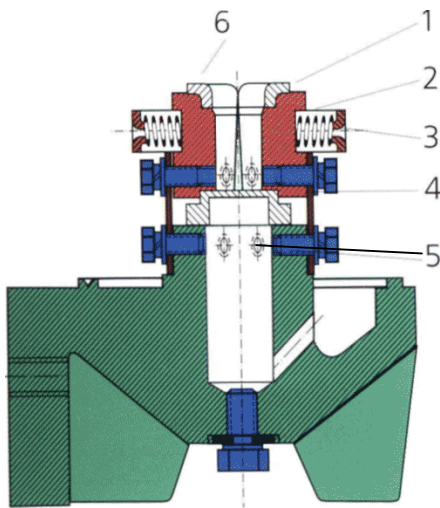


Рис. 5.13 Конструкція нерухомого контакту (розеткового контакту)

- 1 – вхід рухомого провідника;
- 2 – мідний сегмент; 3 – прижимна пружина; 4 – кільце для упору;
- 5 – контактоутримувач;
- 6 – металокерамічне покриття

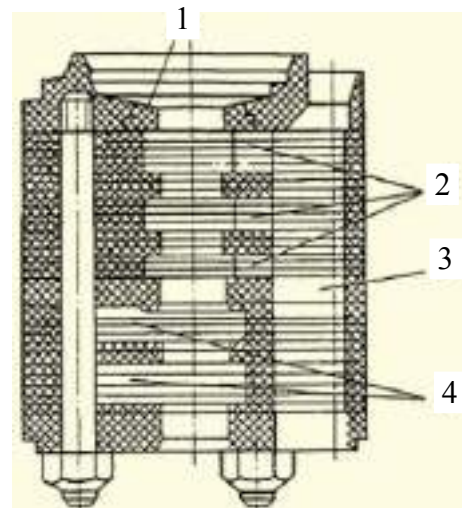


Рис. 5.14 Конструкція дугогасильної камери

- 1 – кільце з фторопласту;
- 2 – видувні щілини для великих струмів; 3 – вертикальний канал;
- 4 – глухі канали

На рис. 5.14 представлена конструкція дугогасильної камери комбінованого масляного дуття, що складається з пакету ізоляційних пластин різної конфігурації, які виконані з електрокартону, фібри і гетинаксу і стягнутих

шпильками. Верхня перегородка має кільце 1, виготовлене з дугостійкого матеріалу (фторопласту). Камера має центральний отвір для проходу рухливого стержня. У верхній частині камери ізоляційні пластини утворюють три поперечні, розташовані одна під інший, видувні щілини 2 для гасіння великих струмів, які пов'язані з вертикальним каналом 3 з під камерним і надкамерними просторами.

У нижній частині камери є дві глухі масляні кишені 4 для гасіння малих струмів. При гасінні малих струмів зважаючи на недостатність тиску газопарової суміші, що утворюється впродовж першого етапу, дуга не гасне при русі стержня уздовж видувальних щілин 2 і досягає глухих кишень 4. В цьому випадку внаслідок незначності об'ємів цих порожнин масло, що міститься в них, навіть при незначному струмі відключення випаровується вибухоподібне. Це призводить до спроби відриву стовпа дуги за рахунок імпульсного підвищення тиску від струмопровідного стержня, оскільки викид газопарової суміші відбуватиметься вгору в зону, вільну від контактної свічки (рухомого контакту).. Конусна втулка, встановлена в середній частині камери, служить для запобігання надмірному розгону рухливого стержня під впливом високого тиску, що виникає в камері при відключенні струмів короткого замикання..

Підкамерний простір сполучається, крім того, з додатковим резервуаром у вигляді сталеві склянки з повітряною подушкою 31, укріпленого на нижньому фланці бачка (див. рис.5.11 б).. Пружна повітряна подушка в сталевій склянці згладжує пульсацію тиску в дугогасильній камері і прискорює очищення її каналів від газів після закінчення гасіння дуги.

У включеному положенні струм йде з нижньої вхідної шини, нерухомому розетковому контактному елементу, рухливому контакту і через роликовий пристрій і направляючі нерухомі стержні виходить до верхньої шини.

При відключенні вимикача, коли звільняється замикаючий пристрій приводу, вал вимикача під дією відключаючих пружин швидко обертається, піднімаючи контактний стержень вгору. Процес розвітку та гасіння дуги показаний на рис. 5.15.

Між контактами вимикача утворюється дуга, викликаючи газоутворення в підкамерному просторі. На першій стадії процесу відключення до моменту відкриття першої поперечної щілини тиск газів в підкамерному просторі росте (стадія замкнутого газового пухиря). На другій стадії щілини по черзі відкриваються і виникає дуття, спрямоване уперек дуги, і дуга гасне. Час гасіння дуги при відключенні великих і малих струмів змінюється від 0,015 до 0,025 с.

При відключенні великих і середніх струмів різниця тисків, що утворилася, між підкамерного простору і верхньою частиною бачка виявляється достатній для того, щоб створити ефективне поперечне дуття після відкриття поперечних щілин.

При відключенні малих струмів поперечне дуття в каналах виходить слабким, гасіння дуги затягується і завершується за допомогою додаткових радіальних струменів дуття з масляних кишень у верхній частині камери. Після закінчення гасіння дуги триває витіснення масла під дією пружної повітряної

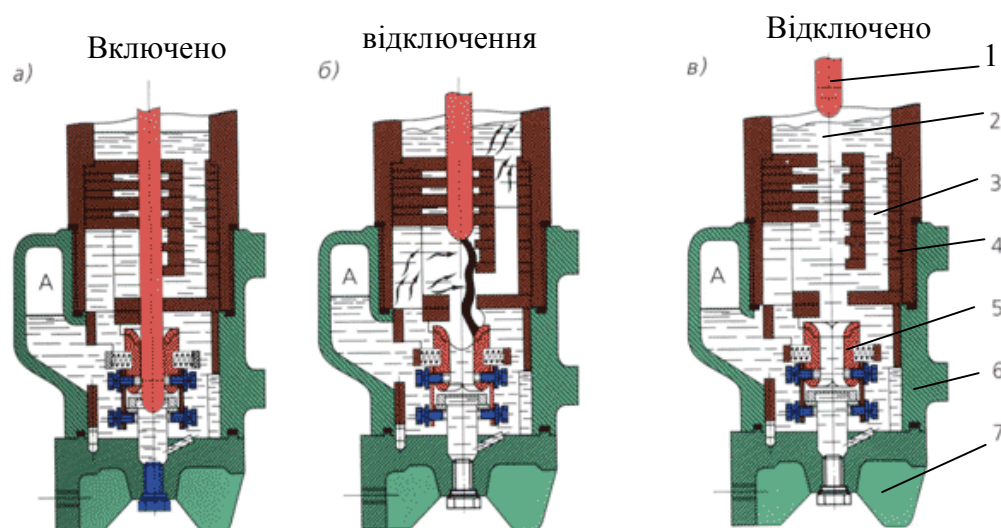


Рис. 5.15 Процес гасіння дуги у маломасляному високовольтному вимикачі
1 – рухомий контакт; 2 – масляна кишень; 3 – вихлопний канал; 4 – ізолюючий циліндр; 5 - розетковий (нерухомий) контакт; 6 - нижній фланець; 7 – кришка полюсу; А – повітряний буфер

подушки із сталевого резервуару. В результаті канали камери швидко очищаються від газів і камера готується для роботи в циклі автоматичного високовольтного вимикача.

Ефективність гасіння дуги і ресурс масляних вимикачів значною мірою обумовлюються фізико-хімічними процесами, що відбуваються в зоні горіння дуги. Продукти розкладання масла (H_2 , C та ін.), що утворюються під впливом дуги, іонізований газ, пари матеріалу контактів знижують відключаючу здатність дуги і обмежують комутаційний ресурс. Вільні частинки вуглецю, утворюючи колоїдну суспензію, знижують електричну міцність ізоляційного проміжку і обважнюють процес виключення після режиму короткого замикання..

Продукти розкладання масла і ізоляційних матеріалів камери впливають на стан контактів, їх структуру і перехідний опір і осідають в нижній частині полюса. Час горіння дуги зростає у міру накопичення продуктів розкладання в маслі. Усе це, природно, вимагає постійного контролю за станом якості масла, його рівнем.

Як і вакуумні вимикачі мало масляні вимикачі можуть мати окремі приводи: пружний, електромагнітний, пневматичний.

Перевагами мало масляних високовольтних автоматичних вимикачів є:

- відносно низька ціна;
- відносно не складну конструкцію;
- можливість ремонту без заміни полюсів;

До недоліків слід віднести:

- наявність значної кількості масла;
- окислення металевих контактів в кислотному середовищі масла;
- пожеже- та вибухонебезпечність;
- необхідність періодичного контролю рівня та якості масла

5.2.1.4 Автоматичні елегазові вимикачі

Газові автоматичні вимикачі переважно використовують гексафторид сірки (елегаз – SF_6) як ізолююче і дугогасильне середовище. Як ізолююче середовище уперше його почали використовувати в 1940, а дугогасильне – в 1952 році, але найбільше застосування він отримав після 1980 років в автоматичних вимикачах.

Елегаз не має кольору і запаху, нетоксичний і пожежобезпечний, з питомою щільністю у п'ять разів вище повітря. Його термічний коефіцієнт передачі тепла в 1,6 разу вище, ніж у повітря. Але елегаз конденсується при температурах нижче – 60°C , що є його недоліком. Крім того має дуже низьку звукопровідність. Його хімічна інертність підтримується до $+150^\circ\text{C}$ і він не атакує метали, пластик та інші матеріали.

При високій температурі силової дуги він розкладається на складові частини, які є корозійними при з'єднанні з вологою. В цьому випадку продукти реакції уявляють білий осад, який є хорошим ізолятором. За статичних умов діелектрична міцність елегазу при 3 атм. порівнянна з електроізолюючим маслом при нормальному атмосферному тиску або в 2,5 разу більше, ніж повітря при тому ж тиску. Головними методами дугогасіння в елегазових автоматичних вимикачах є методи автокомпресії та обертання дуги. У першому методі рух контактів може бути використаний для одночасного здавлювання газу, щоб забезпечити щільний і замкнутий газовий ланцюг і усунути, таким чином, необхідність в зовнішньому компресорі та від ризику попадання вологи. У пізніших розробках також дуга закручується у локальному магнітному полі з дуже високою швидкістю, в наслідок чого і охолоджується, і швидко деіонізується, викликаючи гасіння дуги і зниження струму до нуля.

Застосування у автоматичних вимикачах елегазу замість масла і стислого

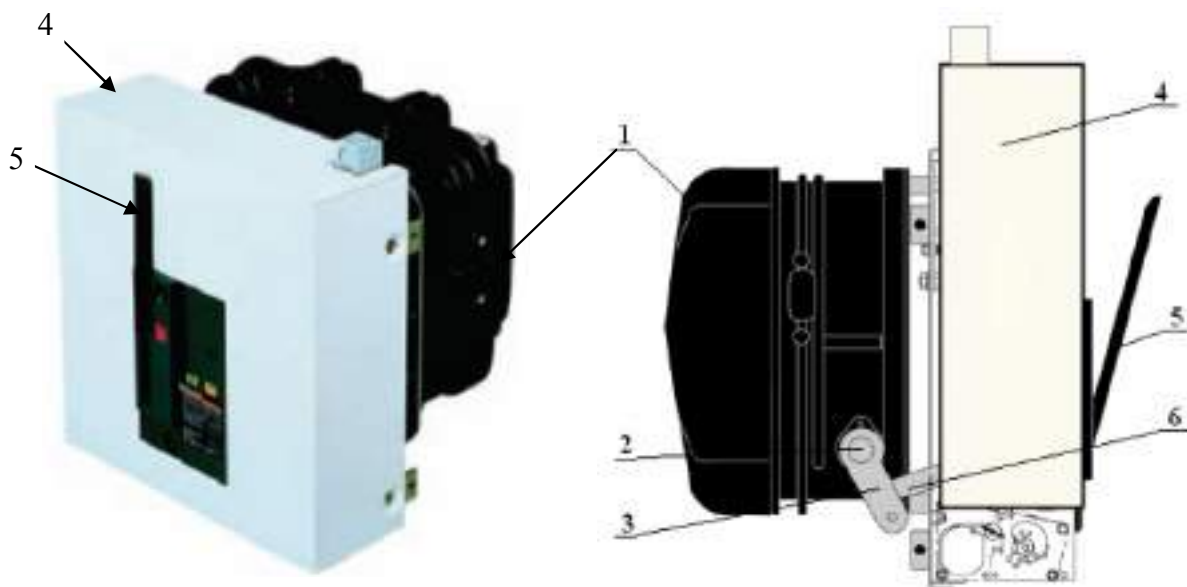


Рис.5.16 Загальний вигляд елегазового автоматичного вимикача серії LF
стаціонарного виконання:

1 – корпус; 2 – вал механізму важелів; 3 – тяга; 4 – з'ємна лицева панель; 5 – ручка ручного взводу пружини; 6 – тяга, яка з'єднує вал приводу з синхронізуючим валом

повітря дозволяє в 2..2,5 разу підвищити параметри дугогасильних пристроїв, істотно зменшити габарити і масу комутаційних апаратів, значно підвищити надійність їх роботи і понизити експлуатаційні витрати за рахунок великих між ревізійних термінів, аж до відсутності експлуатаційного обслуговування впродовж усього терміну служби.

Розглянемо конструкцію та принцип дугогасіння на прикладі элегазового автоматичного вимикача типу LF. Вимикачі серії LF виробництва Merlin Gerin це трифазні вимикачі внутрішньої установки, в якості ізолюючого і дугогасильного середовища яких використаний элегаз. Вимикачі серії LF призначені для комутації номінальних струмів і відключення струмів коротких замикань в розподільних електричних мережах і системах електропостачання 6, 10 і 35 кВ..

Вимикач складається з трьох полюсів, які розташовані в герметичному, заповненому элегазом корпусі зі збитковим тиском 0,15 МПа (1,5 атм). Корпус вимикача виконаний з якісних електротехнічних смол, які мають високу діелектричну та механічну міцність. В залежності від виконання вимикач виготовляють в стаціонарному (базовому) виконанні (рис.5.16), або на виїзній теліжці для встановлення в комплектні розподільні шафи (рис.5.17).

Базова модель вимикача складається з наступних елементів:

- корпуси вимикача, в якому розташовано усі три полюси, що є "посудиною під тиском", заповнений элегазом під низьким надмірним тиском (0,15 МПа або 1,5 атм.);

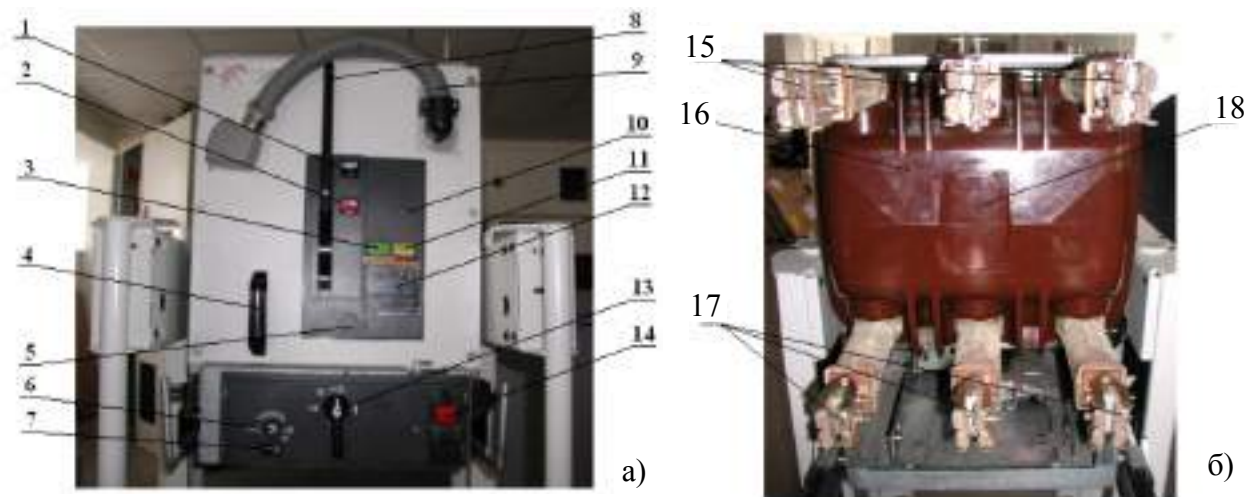


Рис.5.17 Загальний вигляд элегазового автоматичного вимикача серії LF на виїзній теліжці:
а – вигляд з переді; б – вигляд ззаду

- 1 – кнопка включення; 2 – кнопка відключення; 3 – указник положення вимикача;
4 – руків'я для викатування вимикача; 5 – замок для блокування вимикача в положення «Вимкнуто»; 6 – отвір для з'єднання руків'я управління; 7 указник положення виїзної теліжки; 8 – руків'я для взводу пружини; 9 – роз'єднувач; 10 – лічильник кількості відключень; 11 – указник стану пружини; 12 – таблиця вимикача; 13 – селектор управління викатуванням теліжки; 14 – кнопка аварійного відключення (зняття блокування);
15 – верхні втичні контакти; 16 – корпус вимикача; 17 – нижні втичні контакти;
18 клапан для скидання тиску

- механічного приводу типу RI;
- передній панелі приводу з руків'ям для ручного взводу пружин і індикаторами стану пружини і вимикача;
- високовольтних силових контактних майданчиків;
- багатоштырьового роз'єму для підключення ланцюгів вторинної комутації. Додатково вимикачі LF можуть оснащуватися:
- шасі для стаціонарної установки з фіксувальними пристроями;
- механізмом для блокування вимикача в положенні "відключено" за допомогою замку, встановленого на панелі управління;
- клемми для підключення датчика тиску, встановленими на кришці корпусу.

У цьому вимикачі втілений увесь багаторічний досвід компанії в області технологій гасіння дуги. У вимикачі LF застосований принцип обертання дуги в елегазовій середовищі і метод автокомпресії, що в комплексі дозволяє створити найкращі умови для гасіння дуги. Це забезпечує скорочення потужності приводу вимикача, зниження зносу дугогасильних контактів і, таким чином, підвищує механічний і електричний ресурс. Переріз дугогасильної камери наведений на рис. 5.18.

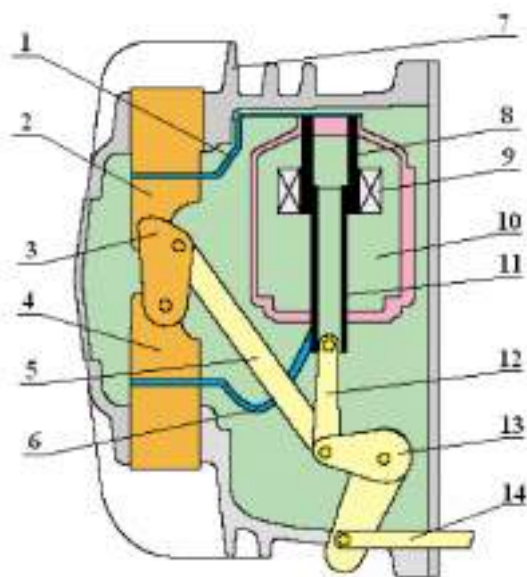


Рис.5.18 Перетин корпусу дугогасильних камер автоматичного вимикача серії LF:
 1 – гнучкий зв'язок верхнього нерухомого контакту; 2 – верхній нерухомий контакт головного ланцюгу; 3 – рухомий контакт головного ланцюгу;
 4 – нижній нерухомий контакт головного ланцюгу; 5 – ізоляційна тяга рухомого контакту головного ланцюгу; 6 – гнучкий зв'язок нижнього нерухомого контакту;
 7 – корпус вимикача; 8 – нерухомий контакт дугогасильного пристрою; 9 – магнітна котушка; 10 – камера дугогасильного пристрою; 11 – рухомий контакт дугогасильного пристрою; 12 – ізоляційна тяга рухомого контакту дугогасильного пристрою; 13 – система ломких важелів; 14 – тяга приводу

Основні етапи гасіння дуги наведені на рис.5.19.

У включеному стані (рис.5.19 а) замкнуті головні контакти (позиція 2,3,4) і дугогасильні контакти (позиція 8,11). Струм протікає через головні контакти. В дугогасильній камері 10 тиск елегазу постійний і дорівнює номінальному тиску в корпусі вимикача.

При подачі команди на відключення (рис.5.19 б) зовнішній привід забезпечує переміщення рухомої системи вимикача – рухомого головного контакту 3 і рухомого дугогасильного контакту 11, які жорстко зв'язані між собою за допомогою системи ломких важелів 13 і тяги 14 з силовим привідним

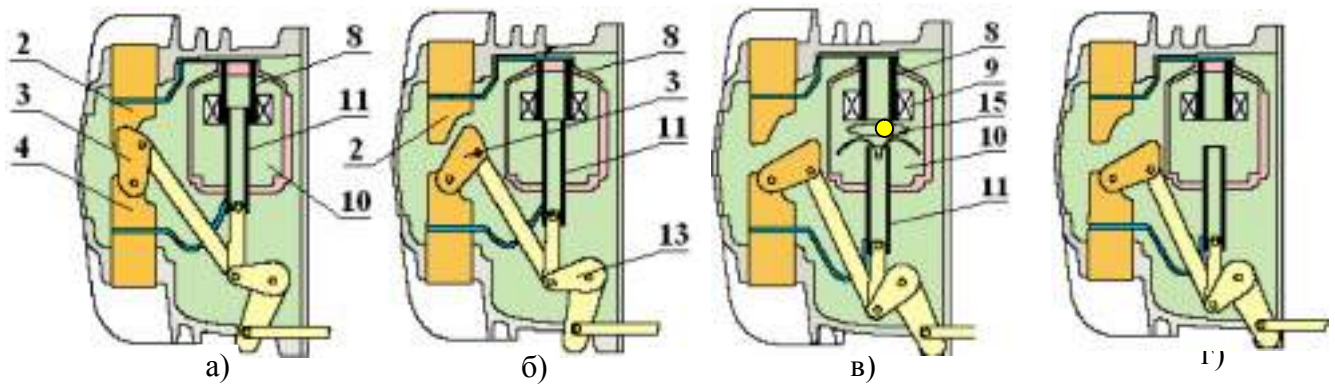


Рис.5.19 Основні етапи гасіння дуги автоматичного вимикача серії LF:

а- вимикач замкнутий; б – головні контакти розімкнені, а дугогасильні контакти замкнуті;

в – гасіння дуги; г – вимикач вимкнутий

2 – верхній нерухомий контакт головного ланцюгу; 3 – рухомий контакт головного ланцюгу; 4 – нижній нерухомий контакт головного ланцюгу; 8 – нерухомий контакт дугогасильного пристрою; 9 – магнітна котушка; 10 – камера дугогасильного пристрою; 11 – рухомий контакт дугогасильного пристрою; 13 – система ломких важелів; 15 – дуга

механізмом. З початку розмикається головний контакт (позиція 2,3), а потім дугогасильні контакти (позиція 8,11).

При розходженні дугогасильних контактів (позиція 8,11) в дугогасильній камері відбувається загоряння дуги 15 між нерухомим 8 і рухомим 11 дугогасильними контактами (рис.5.19 в). Це приводить до різкому збільшенню температури газового середовища та росту тиску в дугогасильній камері 10. В свою чергу взаємодія дуги з магнітним полем котушки 9 викликає інтенсивний обертальний рух дуги по дугогасильним контактам і викликає підвищення взаємодії дуги з елегазом, що викликає інтенсивну турбулізацію і нагрів газу у дугогасильній камері. В результаті продукти горіння дуги видуються в

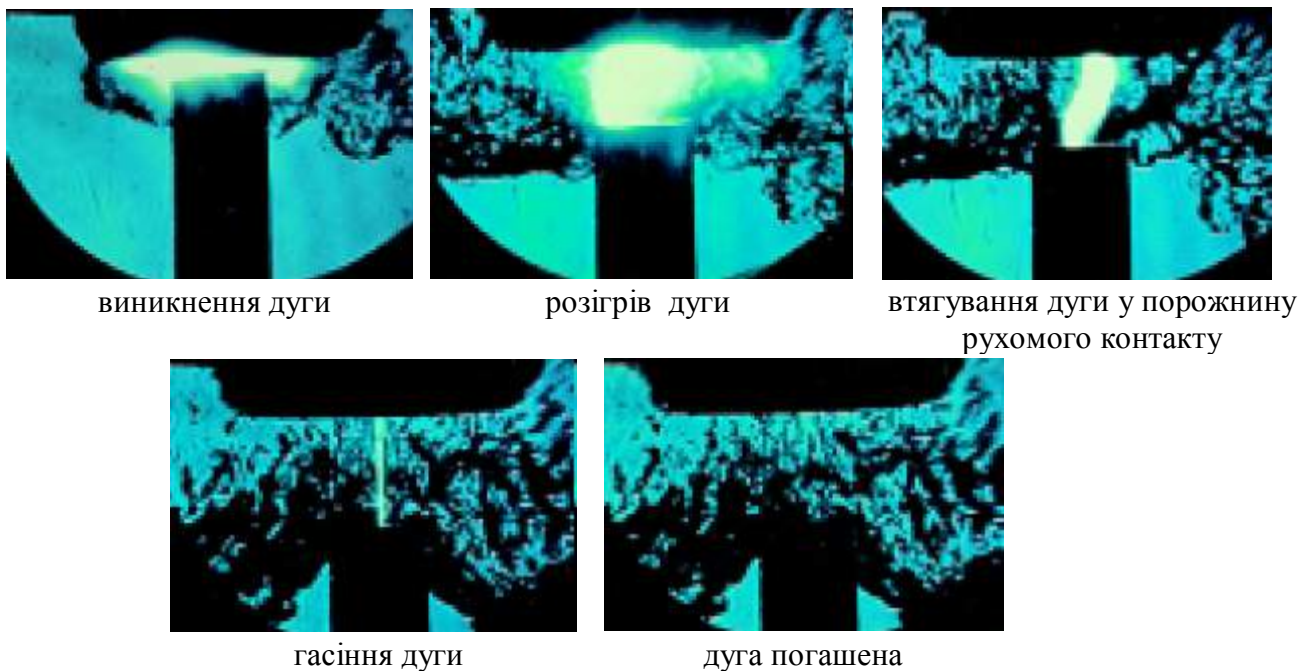


Рис.5.20 Процес гасіння дуги у дуговій камері автоматичного вимикача серії LF:

порожнину циліндричного рухомого контакту 11, а міжконтактний проміжок заповнюється елегазом з більш низькою температурою та більш високими діелектричними властивостями. При проходженні струму через нуль внаслідок активної деіонізації міжконтактного проміжку і збільшенню електричної міцності газу, дуга гарантовано гасне, а напруга на розімкнутих дугогасильних контактах відтворюється. Процес гасіння дуги завершений, а вимикач вимкнений (рис.5.19 г).

Описаний процес гасіння дуги детально ілюстрований на рис. 5.20.

Вимикачі серії LF приводяться в дію приводом RI, який забезпечує незалежність швидкості включення і відключення від оператора. Поєднання приводу RI і стандартного мотора-редуктора забезпечує можливість дистанційного керування і здійснення циклу автоматичного повторного включення. Вимикачі LF забезпечені механізмом для блокування вимикача в положенні "відключено" за допомогою замку, встановленого на панелі управління.

Електропривод RI включає (рис.5.21):

- енергонакопичувальний механізм пружинного типу, забезпечує запас енергії, необхідної для включення і наступного відключення вимикача;
- важіль ручного взводу приводу;
- пристрій автоматичного взводу пружин з електродвигуном, що здійснює взвод приводу відразу ж після включення апарату (на протязі не більш 15 с);
- механічний пристрій включення і відключення за допомогою двох кнопок, розташованих на передній панелі;
- електричний пристрій включення складається з: котушки включення з блокуванням від багатократних включень;
- електричний пристрій відключення, що має одну або декілька котушок відключення, які можуть бути наступних типів: котушка відключення на подачу напруги; котушка відключення мінімальної напруги з

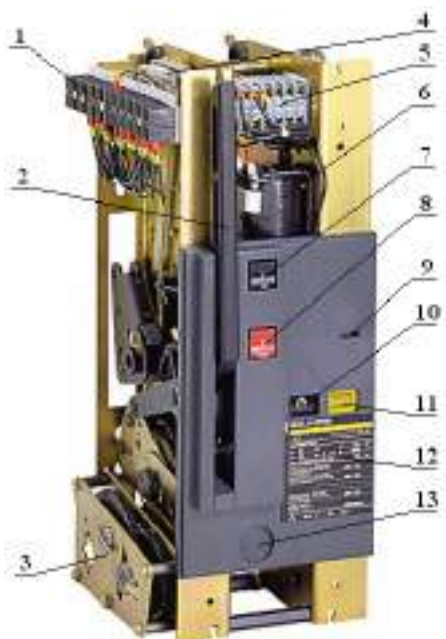


Рис.5.21 Загальний вигляд приводу автоматичного вимикача серії LF:

- 1 – клема вторинних ланцюгів; 2 – руків'я ручного взводу пружини; 3 – мотор-редуктор приводу; 4 – реле блокування від багатократних включень; 5 – блок контакти (11 пар); 6 – котушка відключення; 7 – котушка включення; 8 – кнопка відключення; 9 – лічильник циклів «Включено/Відключено»; 10 – указник положення вимикача (I – включено, O – відключено); 11- указник стану пружини; 12 – паспортна таблиця; 13 – місце для встановлювання вбудованого замка блокування в положенні відключено

регульованою витримкою часу - від 1 до 3 с; _ котушка відключення типу МІТОР з низьким споживанням енергії, використовувана в комплекті з цифровою системою релейного захисту SEPAM 100LA;

- лічильник циклів В-О;
- контакт сигналізації про взвод приводу;
- контакт сигналізації про закінчення взводу приводу;
- індикатор стану "відключено / включено";
- багатоконтактний роз'єднувач для підключення вторинних ланцюгів сигналізації і управління;
- механічний показчик стану пружини і блок з 14 допоміжних контактів.

Експлуатація вимикача за номінальних технічних умов не вимагає обслуговування механічного приводу впродовж 10 років або впродовж 10000 циклів, а обслуговування дугогасильної камери вимикача не потрібно впродовж усього терміну експлуатації. Безпека і надійність експлуатації електроустановок з вимикачами серії LF гарантована можливістю відключення номінальних струмів при номінальній напрузі навіть у разі порушень герметичності камери вимикача і при нульовому надмірному тиску.

Перевагами елегазового вимикача є :

- зручність в експлуатації і технічною обслуговуванні;
- порівняно невисока вартість проведення технічного обслуговування;
- невеликі габаритні розміри;
- висока відключаюча здатність;
- великий комутаційний ресурс;
- малий власний час відключення і включення;
- тривалий термін служби.

До недоліків елегазових вимикачів слід віднести:

- відносно дорогі у виготовленні;
- строгі вимоги до якості елегазу;
- не можливість роботи при низьких температурах довкілля (нижче -50°C);
- досить дорога вартість елегазу.

5.2.1.5 Автоматичні повітряні вимикачі.

Ізольюючим матеріалом автоматичних повітряних вимикачів є повітря, яке має відносно невисоку електричну міцність (2...3 кВ/мм), що не дозволяє використовувати їх для комутації високих напруг. Методи гасіння дуги в таких вимикачах відрізняються в залежності від рівня напруги.

Для комутації напруг до 1000 В для гасіння дуги використовують наступні засоби підвищення дугової напруги (мінімального значення напруги, яке необхідне для підтримання дуги):

1. Збільшити напругу дуги за рахунок охолодження дугової плазми. По мірі зменшення температури дугової плазми рухливість носіїв заряди в дуговій плазмі зменшується, тому для підтримки дуги потрібно вищий градієнт напруги.

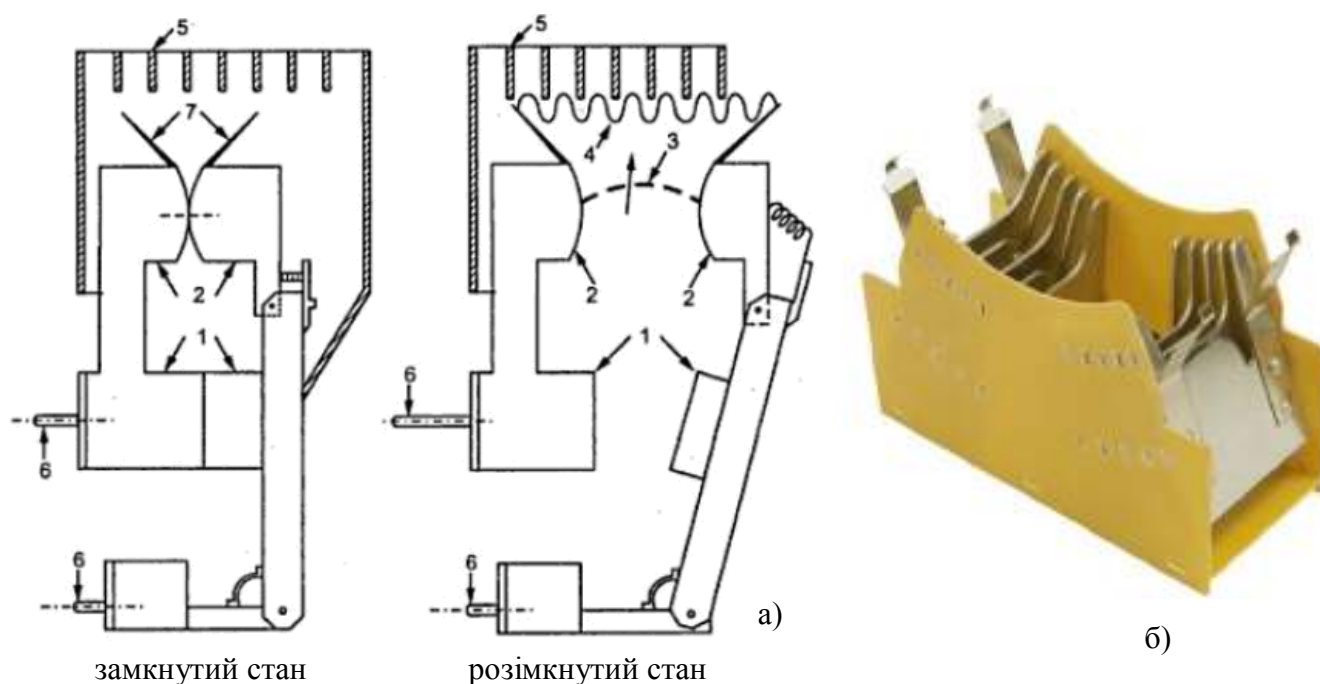


Рис. 5.22 Основні етапи гасіння дуги (а) та зовнішній вигляд дугогасильної камери (б) в повітряних вимикачах з напругою до 1000 В:

- 1 – основні контакти; 2 – дугогасильні контакти; 3 – місце виникнення дуги на початку розриву контактів (стрілка показує зміщення дуги до дугогасильної камери); 4 – розподілення дуги на послідовність малих дуг; 5 – дугогасильна камера; 6 – силові клеми

2. Збільшити напругу дуги за рахунок подовження дуги. По мірі збільшення довжини шляху дуги опір шляху збільшується і, отже, для підтримки того ж дугового струму потрібно додаткову напругу для проходження по дуговому шляху. Це означає, що напруга дуги збільшується.

3. Розподіл дуги на ряд послідовних дуг, що також збільшує напругу дуги.

Перший засіб зазвичай досягається за рахунок приводу дуги в контакт з більшою площею з ізоляційного матеріалу. Кожен повітряний вимикач оснащений камерою, що оточує контакт – дугова камера. Дуга приводиться в неї. Якщо внутрішня частина дугового жолоба має відповідну форму, і якщо дуга може відповідати формі, стіна дугового жолоба допоможе добитися охолодження. Цей тип дугогасильних камер має бути зроблений з вогнестійкого матеріалу.

Другий засіб, який подовжує шлях дуги досягається одночасно з першим засобом. Якщо внутрішні стінки дугового жолоба сформовані таким чином, що дуга не лише примусово наближається до неї, але також приводиться в змієподібний канал, що проектується на стінку дугового жолоба. Подовження дугової доріжки збільшує опір дуги.

Третій засіб досягається за рахунок використання металу дугового різання усередині дугогасильної камери. Головний дуговий жолоб розділяється на кількість невеликих відсіків з використанням металевих розділових пластин. Ці металеві розділові пластини насправді є дуговими розгалужувачами, і кожен з невеликих відсіків поводить як окремий міні-дуговий жолоб. У цій системі

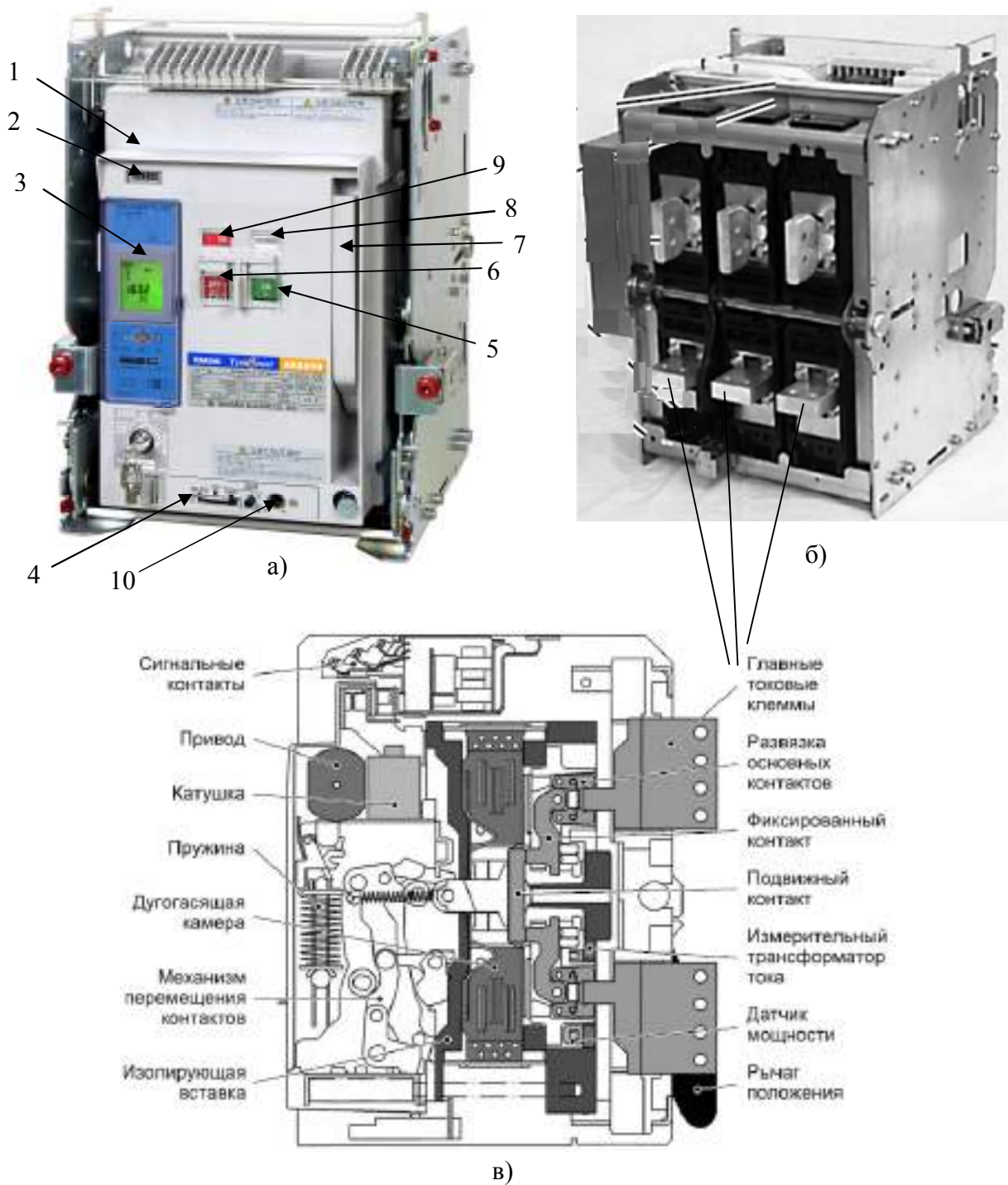


Рис. 5.23 Загальний вигляд (а – з переду; б – з заду) та перетин одного полюсу (в) повітряного автоматичного вимикача типу **TemPower2**:

- 1 – лицева кришка; 2 – лічильник кількості відключень; 3 – розціплювач максимального струму; 4 – блок стану вимикача; 5 – кнопка включення; 6 – кнопка відключення; 7 – руків'я взводу пружини; 8 – індикатор стану пружини; 9 – індикатор стану вимикача; 10 – отвір для руків'я, що висуває вимикач

початкова дуга розбивається на ряд послідовних дуг, кожна з яких має свій власний міні-дуговий жолоб (рис.5.22)..

Прикладом автоматичного вимикача такого типу є серія потужних стаціонарних автоматичних вимикачів виїзного типу **TemPower2**, які

призначенні для встановлення в комірці комплектних розподільних пристроїв. Вони призначені для роботи з трьохфазними мережами частотою 50 Гц з номінальною напругою до 690 В та номінальними струмами від 800 до 4000 А. Мають системи подвійного розриву головних контактів, що гарантує швидке гасіння дуги струму короткого замикання до 100 кА зі швидкодією до 0,03 с. Зовнішній вигляд даного вимикача наведений на рис.5.23).

Низька електрична міцність повітря не дозволяє використовувати описану конструкцію дугогасильної камери для високих напруг (вище 1000 В). При високих напругах необхідне підвищення електричної міцності повітря, що можливо зробити підвищенням тиску повітря в дугогасильному каналі.

Стисле повітря, яке подається в дугогасильний канал під тиском 2...4 МПа, є ефективним середовищем, що забезпечує надійне гасіння електричної дуги. Це досягається інтенсивною дією з максимально можливими швидкостями потоку повітря на дуговий канал. У дугогасильних камерах повітряних вимикачів гасіння електричної дуги відбувається в дутьєвих каналах (соплах), які конструктивно в сукупності з кінцевою частиною контактів дуго гасника утворюють дутьєву систему. Стовп дуги, що утворилася на контактах, які розмикаються, під дією повітряного потоку розтягується і швидко переміщається в сопла, де відбувається її гасіння.

Залежно від форми і взаємного розташування контактів і сопел гасіння дуги в таких пристроях може відбуватися при:

односторонньому (подовжньому) дутті через металеве сопло (рис. 5.24, а);
односторонньому (подовжньому) дутті через ізоляційне сопло (рис. 5.24, б);

двосторонньому симетричному (подовжньому) дутті через соплоподібні порожнисті контакти (рис. 5.24, в);

двосторонньому асиметричному (подовжньому) дутті через соплоподібні порожнисті контакти (мал. 5.24, г).

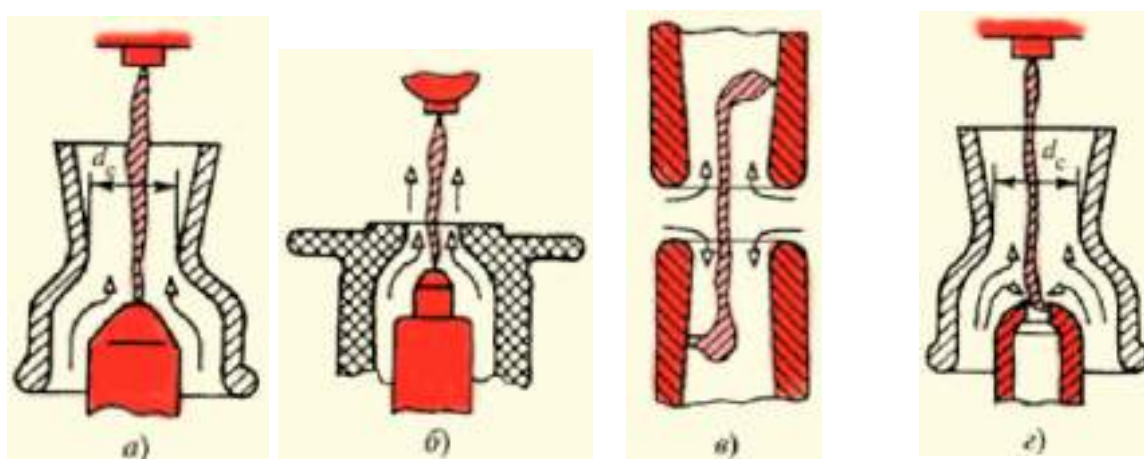


Рис. 5.24 Схеми подовжнього дуття стислого повітря для гасіння дуги в високовольтних автоматичних вимикачах за допомогою стислого повітря:

а – одностороннє дуття через металеве сопло; б – одностороннє дуття через ізоляційне сопло; в – двостороннє симетричне дуття через соплоподібні порожнисті контакти; г – двостороннє асиметричне дуття через соплоподібні порожнисті контакти

Найкращі показники отримані у вимикачах з дугогасильними системами, що використовують двостороннє асиметричне дуття.

У механізмі гасіння електричної дуги тісно переплітаються як електричні процеси в стовпі дуги, так і газотермодинамічні процеси витікання газового струменя. Своєрідність витікання газу з дугогасильного пристрою полягає в тому, що потік газу зустрічає на своєму шляху потужне джерело теплоти, яким є дуга і який гальмує повітряний потік, тобто зменшується витрата повітря, що протікає через сопло з дугою. Це явище, зване "термодинамічний ефект", може призводити до повної закупорки сопла електричною дугою, що викликає руйнування дугогасильної системи. Таким чином, розмір (діаметр сопла d_c на рис. 5.24, а, г) дутьової системи визначає максимально можливий струм відключення вимикача.

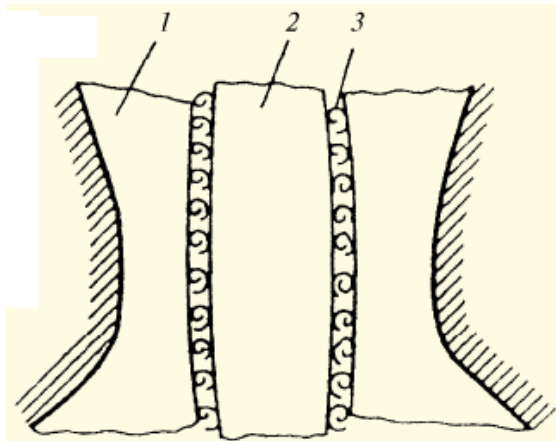


Рис.5.25 Схема течії холодного газу і плазми стовпу дуги в системі повздовжнього дуття дугогасильного пристрою:

- 1 – область потоку холодного газу;
- 2 – область стовпа дуги; 3 – межева турбулентна область

Висока ефективність охолодження каналу стовпа дуги аксіальним потоком газу пояснюється виникненням інтенсивної турбулентної конвекції на межі двох потоків (рис.5.25). Збільшення опору дугового проміжку, що визначає електричну міцність в повітряних вимикачах, великою мірою залежить від струму, що відключається.

Необхідно відмітити, що гасіння дуги в повітряних вимикачах здійснюється струменем стислого повітря, інтенсивність якого не залежить від потужності дуги, оскільки гасіння робиться за рахунок енергії стороннього джерела. Тому відповідною подачею повітря можна забезпечити надійне і

швидко гасіння дуги. Але такі вимикачі потребують окремого джерела стислого повітря, та мають значні габарити, тому практично не використовуються у судновому обладнанні.

До переваг високовольтних повітряних вимикачів можна віднести:

- високу відключаючу здатність;
- пожежебезпечність;
- високу швидкодія;
- здатність комутації струмів короткого замикання з великим відсотком аперіодичної складової (аж до комутації ланцюгів постійного струму).

Недоліками високовольтних повітряних вимикачів є:

- наявність дорогого постійно діючого компресорного устаткування;
- висока чутливість до швидкості напруги, яке відновлюється, при не видаленому короткому замиканні.;
- можливість "зрізу" струму при відключенні малих індуктивних струмів (відключення ненавантажених силових трансформаторів).

5.2.2 Розподільне обладнання

В енергетичних системах судна для розподілення електричної енергії споживачам, контролю за параметрами енергетичної системи, а також для оперативного управління розподілом електроенергії використовуються комплектне розподільне обладнання (КРУ), до складу якого входять автоматичні вимикачі, розчіплювачі, збірні шини, трансформатори струму та напруги, контрольні пристрої та ін.

Комплектне розподільне обладнання – це обладнання, яке служить для прийому і розподілу електричної енергії на судні і складається з шаф і сполучних елементів (наприклад, струмопроводів), що поставляються окремими



Рис.5.26 Загальний вигляд комплектного розподільного обладнання з одностороннім обслуговування

шафами або блоками, які сумісно виконують функцію по прийому та розподіленню електроенергії.

Комплектне розподільне обладнання повністю проектується і виготовляються на заводах; на судні вони лише монтуються. На напругу до 35 кВ окремі шафи комплектного розподільного обладнання з'єднуються між собою боковими стінками в ряд і мають повітряну ізоляцію (рис.5.26). Для напруг вище 35 кВ повітряна ізоляція не може бути використана, тому усі елементи, які знаходяться під високою напругою розміщують у герметичних камерах, які заповненні електричним ізоляційним маслом. Такі шафи мають складну конструкцію, що зовні подібна мережі трубопроводів.

На суднах комплектне розподільне обладнання частіше використовують з одностороннім доступом (коли шафи встановлюються в дотик до стіни), але

можуть бути і двохстороннього обслуговування, коли шафи встановлюють на певній відстані від стіни.

По конструктивному виконання комплектне розподільне обладнання буває висувного типу – коли основний комутаційний апарат встановлюється на виїзній тележці, або стаціонарного типу – коли основний комутаційний апарат розміщується безпосереднє у корпусі шафи.

Кожний шаф комплектується розподільного обладнання має типову конструкцію, яка декілька змінюється в залежності від виробника. Але завжди виконується принцип розподілу на відсіки для різного призначення. Звичайно шафи розділяються на відсіки (рис.5.27).:

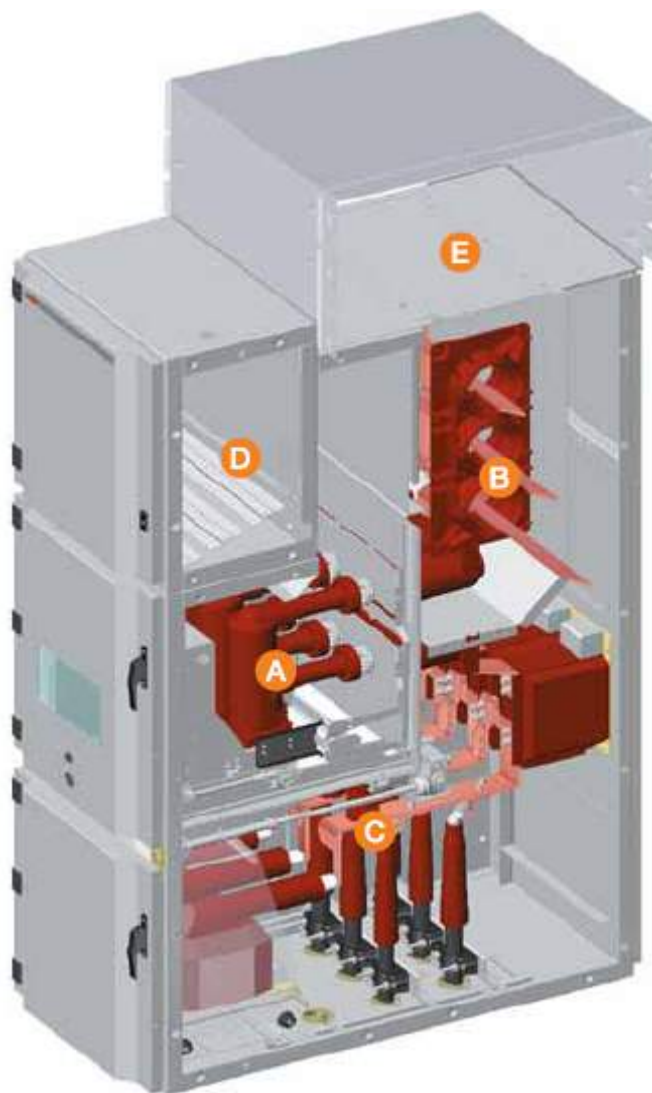


Рис.5.27 Розподіл шафи комплектного розподільного обладнання з одностороннім обслуговуванням на відсіки на прикладі середньовольтової секції типу UniGear ZS1 з повітряною ізоляцією:

A – відсік високовольтного вимикача; B – відсік збірних шин; C – кабельний відсік; D – низьковольтний відсік; E – компактний газовий канал

- низьковольтний відсік де розташовуються низьковольтні елементи (релейні, мікропроцесорні контрольні та ін.);

- відсік висувного елемента (автоматичні високовольтні вимикачі, високовольтні розчиплювачі та ін.);

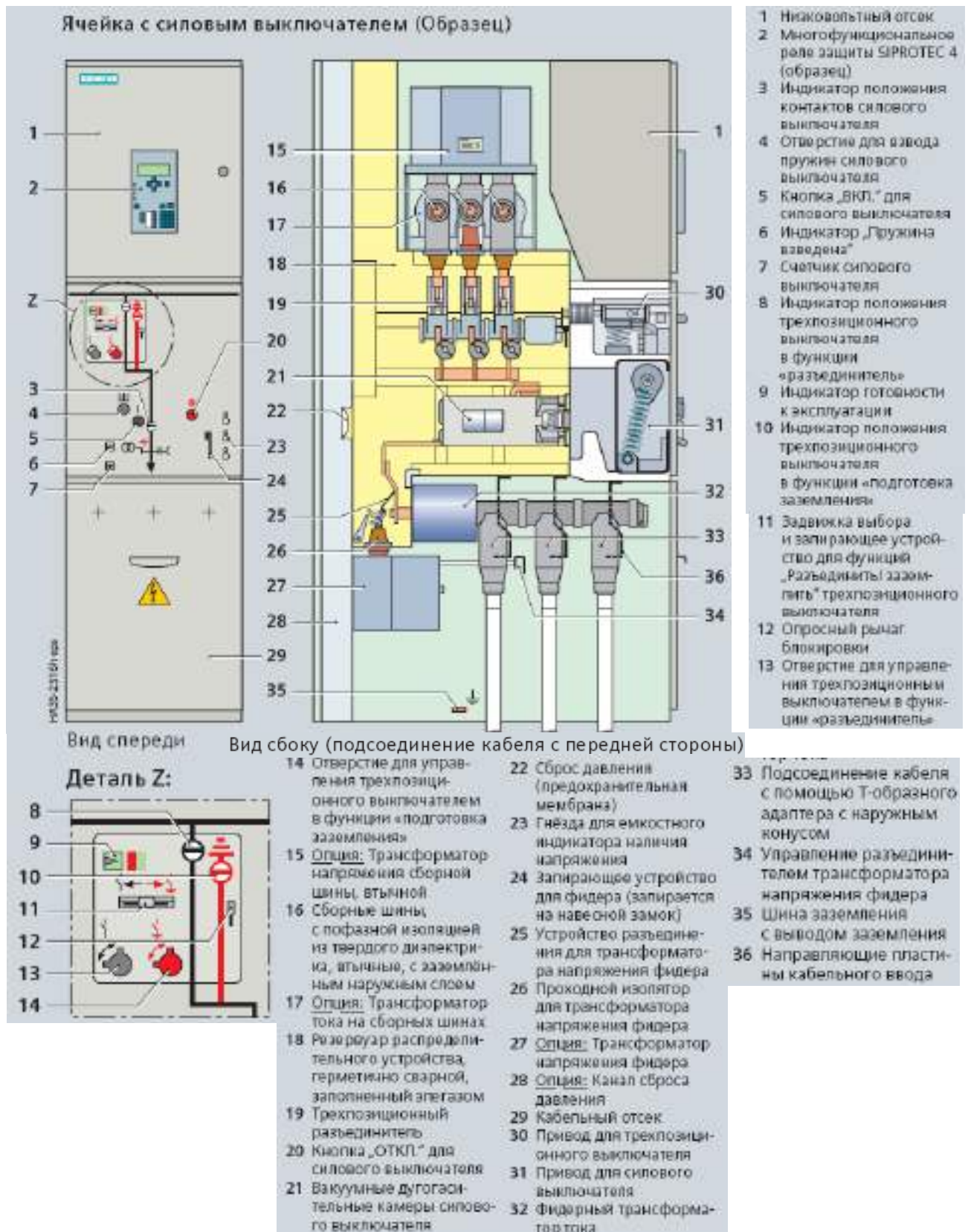


Рис.5.28 Конструкція секції комплектного розподільного обладнання з одностороннім обслуговуванням на прикладі високовольтової секції типу NXPLUS C з елегазовою ізоляцією та вкатним автоматичним вимикачем:

- відсік збірних шин, в якому розміщені шини, що служать для приєднання до загальних високовольтних струмопроводів;
- відсік вводу-виводу (кабельний відсік), через який проходять основні струмопроводи.
- при використанні не герметичних повітряних вимикачів та розчиплювачів, шаф має також канал для відводу газів, які виникають при виникненні дуги.

Відсік збірних шин містить головну систему збірних шин, підключену до верхніх стаціонарних роз'ємних контактів вимикача за допомогою шинних струмовідводів. Головні збірні шини виготовлені з електролітичної міді. До 2500 А система утворена плоскими збірними шинами; для струмів від 3150А до 4000 А використана спеціальна D - подібна шина. Збірні шини покриті ізоляційним матеріалом. Відсік збірних шин є загальним по усій довжині розподільного пристрою до 31,5 кА, який може бути розділений на відсіки. При струмі до 31,5 кА перегородки у відсіку обов'язково встановлюються в кожній третій шафі. Для струмів 40/50 кА ці перегородки є стандартною конструктивною особливістю в кожному шафі.

Кабельний відсік включає систему кабельних струмовідвідів для підключення силових кабелів до нижніх роз'ємних контактів силового вимикача. Контакти для підключення силового кабелю виконані плоскими шинами з електролітичної міді і покриті ізоляційним матеріалом, для повного діапазону струмів. Для 17,5 кВ і 24 кВ ці контакти поставляються з ізоляційними кожухами. У кабельному відсіку може бути встановлений заземлювач для заземлення силового кабелю. Такий же пристрій можна використовувати для заземлення системи збірних шин (шафа виміру або шафа секціонування).

Заземлювач може бути також встановлений в призначеному для цього відсіку для заземлення безпосередньо системи збірних шин (заземлення збірних шин). Заземлювач має здатність включатися на коротке замикання. Управління заземлювачем здійснюється з переднього боку комплектного розподільного шафу вручну або в якості опції моторним приводом. Положення заземлювача відображується на передній стороні шафи за допомогою механічно пов'язаного індикатора. Заземлючі шини виготовлені з електролітичної міді. Вони проходять через усю довжину розподільного пристрою, завдяки чому гарантуються максимальна безпека персоналу і установки.

Ізоляційні прохідні ізолятори, розміщені у відсіку автоматичного вимикача, містять контакти для з'єднання автоматичного вимикача з відсіком збірних шин або кабельним відсіком. Вони є однополюсними і виготовлені з епоксидної смоли. Шторки - металеві і автоматично активізуються під час пересування автоматичного вимикача з контрольного положення в робоче і навпаки.

Типова принципова конструкція секції комплектного розподільного обладнання з високовольтним вакуумним автоматичним вимикачем та елегазовою ізоляцією наведена на рис.5.28.

Морські умови експлуатації висувають відносно жорсткі вимоги до високовольтного комплектного розподільного обладнання: широкий діапазон

температур, підвищена вологість повітря, значна вібрація та значний нахил, який змінюється у часі. Це потребує від виробника, щоб високовольтне комплектне розподільне обладнання відповідало вимогам морських реєстрів для палубного обладнання. Наприклад, комплектне розподільне обладнання UniGear ZS1 у морському (рис.5.29) виконанні забезпечує:

- стійке до внутрішніх дугових замикань механічне аварійне блокування, автоматичні захисні шторки і управління апаратами при закритих дверях забезпечують безпеку обслуговуючого персоналу під час монтажу, технічного обслуговування і експлуатації;
- високу ступень захисту (до IP 43).
- металеві перегородки між кожним відсіком і заземлення усіх відсіків,

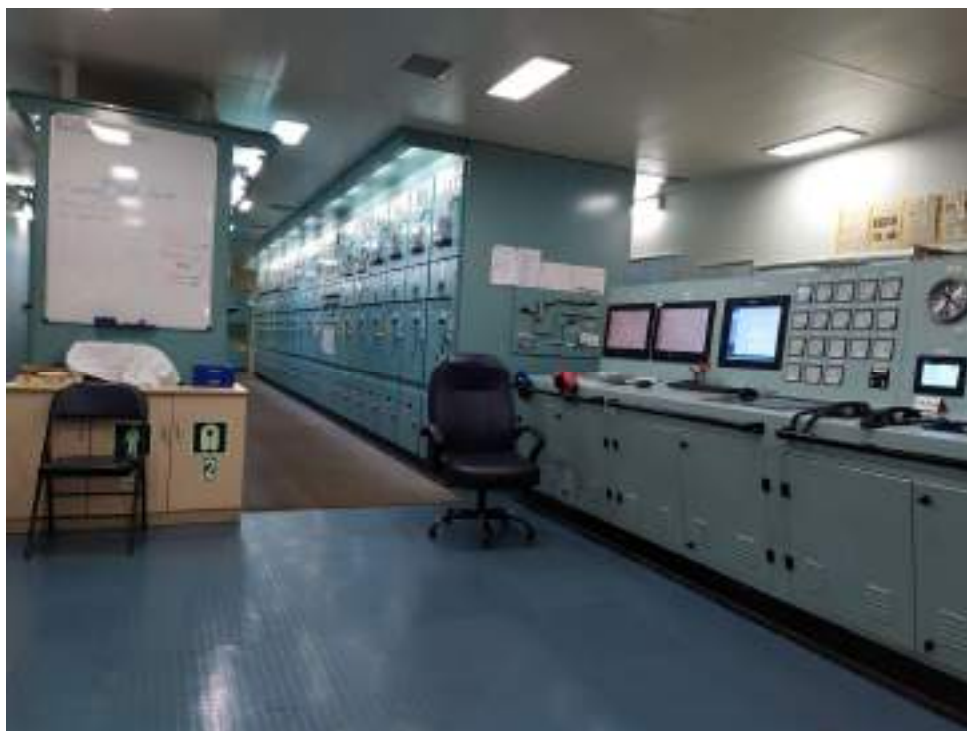
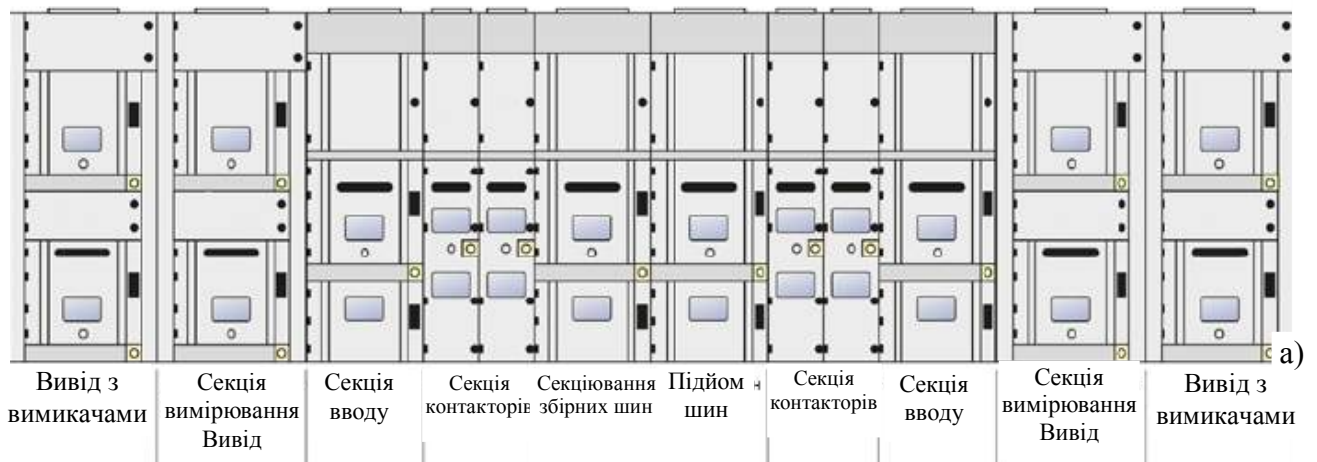


Рис.5.29 Типова конструкція комплектного розподільного обладнання типу UniGear ZS1 для суднової електромережі (а) та зовнішній вигляд комплектного розподільного обладнання на судні MSV Brunella (б)

доступних для обслуговуючого персоналу, : апарати, шторки, двері і уся оболонка розподільного пристрою.

- висока вогнестійкість в результаті мінімального застосування пластмаси і смоли : допоміжне устаткування і дроти не підтримують процес горіння.
- температура навколишнього повітря від 0 до + 45 °С;
- нахил до 25° постійно;
- витримує вібрацію в діапазоні частоти 2.. 100 Гц при амплітуді до 1 мм
- має окрему секцію для передавання електроенергії з берега на судно;
- має мікропроцесорну систему контролю параметрів електромережі;
- має систему ІЧ датчиків, які забезпечують контроль температури у розподільному обладнанні;

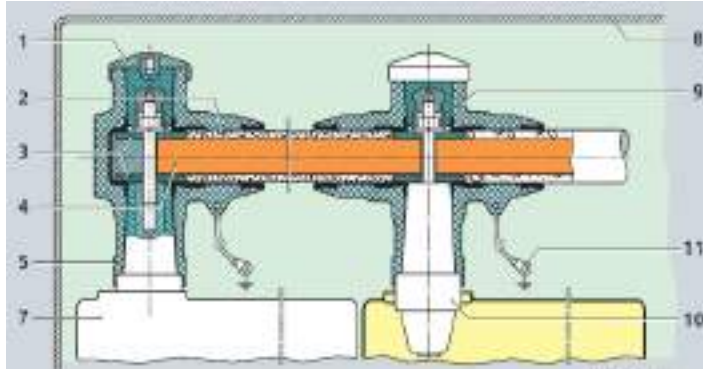


Рис.5.30 Типова конструкція збірних шин:
1 – кришка; 2 – ізоляція шини з силіконового каучуку; 3 – затискувачі; 4 – збірна шина з міді; 5 – кінцевий адаптер; 6 – контактний болт;
7 – резервуар розподільної секції;
8 – металевий корпус відсіку; 9 – хрестовий адаптер; 10 – прохідний ізолятор вводу;
11 – дріт заземлення

струму фази.

Для вимірювання струму в розподільному обладнанні використовують трансформатори струму опорного (рис.5.31 а) або кільцевого (рис.5.31 б) струму. Зазвичай вони встановлюються на збірній шині (рис.5.31 в), у місті підключення секції (фідерні трансформатори) та на кабелі. Їх виконують з електричною ізоляцією з смоли або силіконового каучуку. Трансформатори струму також використовують для заміру струму короткого замикання.

Типова конструкція збірних шин наведена на рис.5.30.. Їх особливості наступні:

- пофазне виконання втичного типу з різьбовим кріпленням;
- струмопровід фази виготовлений з міді з ізоляцією з силіконового каучуку;
- з'єднання збірних шин виконується хрестоподібними та кінцевими адаптерами з силіконового каучуку;
- екранування полю виконується за допомогою струмопровідних покриттів на поверхні ізоляції, як зовні так і внутрі;
- безпечність при доторканні завдяки металевому корпусу відсіку збірних шин;
- можливість встановлення трансформатора струму на збірну шину для контролю

Для контролю високої напруги використовують трансформатори напруги. Крім того такі трансформатори використовують також для живлення контрольно-вимірювальної апаратури та релейного захисту. Зазвичай трансформатори напруги встановлюють на збірних шинах та на вході секції. Трансформатори напруги часто комплектуються окремим запобіжником. Вони бувають втичного типу, стаціонарного типу та які встановлені на виїзній тележці (рис.5.31 г,д,е).

Температуру в об'ємі відсіків, які складають розподільне обладнання контролюють за допомогою температурних датчиків, які встановлюються поблизу найбільш нагріваємих компонентів секції: контактів збірних шин, на верхніх та нижніх розривних контактів вимикачів. В якості температурних датчиків в останній час використовують ІЧ датчики температури з широким, або вузьким кутом обзору. Такі датчики передають інформацію до приймачів за допомогою ІЧ діодів. Зазвичай використовують по три датчика: по одному на

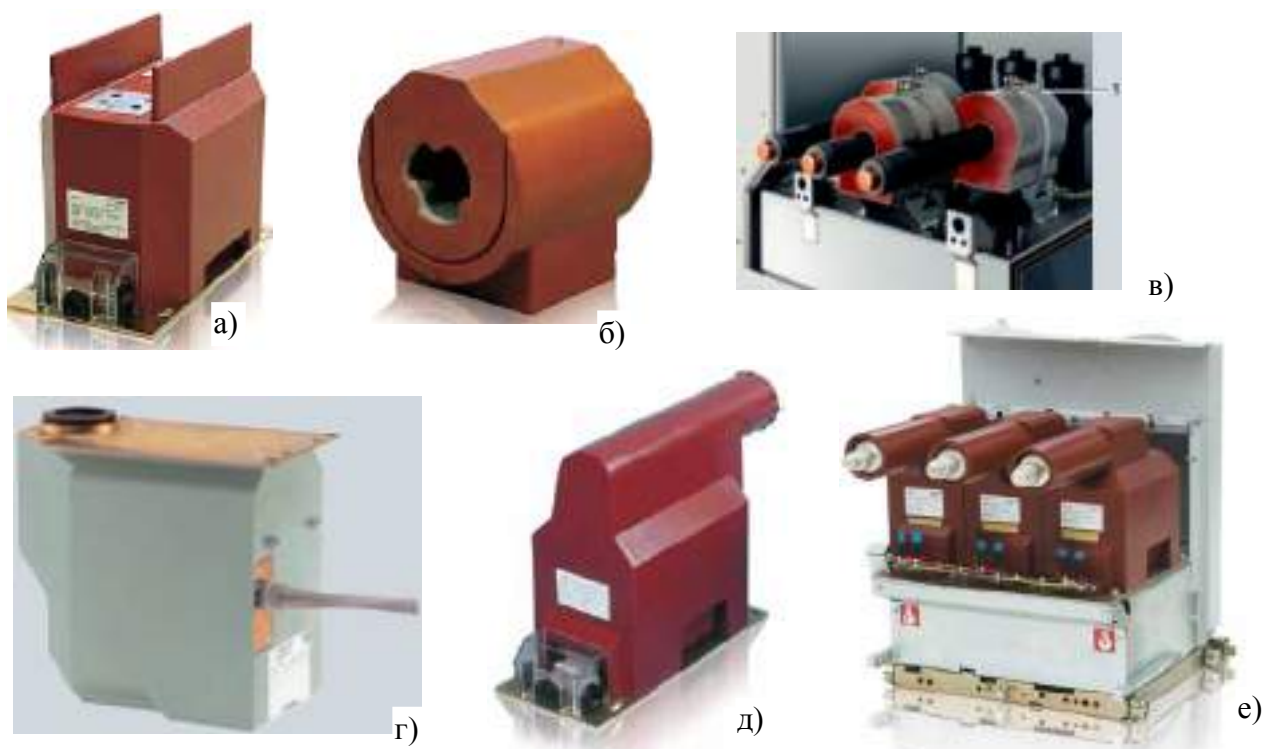


Рис.5.31 Загальний вигляд трансформаторів струму(а,б,в) та трансформаторів напруги (г,д,е)::
 а – опорного типу; б – кільцевого типу; в – встановлення трансформатора на збірних шинах;
 г- трансформатор втичного типу; д – стаціонарний трансформатор напруги з запобіжником;
 е - трифазний трансформатор напруги на виїзній тележці

кожний вхід фази. Приймачі приймають інформацію о температурі, перетворюють її в визначену послідовність електричних сигналів, яка порівнюється з початковими встановленими параметрами та передаються в комп'ютерну мережу. Якщо температура не перевищує заданого значення, то система видає на лицеву панель блоку сигнал нормального режиму. Якщо температура перевищує задане значення спрацьовує сигнал аларму.

Кожний датчик має свій адресний номер, який комп'ютерна система прив'язує до місця встановлення датчику. Таким чином система може

локалізувати місце підвищення температури у відсіку. Для підвищення надійності кожний температурний датчик само тестується, що дозволяє виявити несправний датчик температури. Час опитування датчиків складає 4...10 с.

Прикладом такої системи контролю температури є системи Safe Guard 330 та Safe Guard 370.

Контрольні питання до розділу 5

1. Загальні вимоги до високовольтного електрообладнання на напругу вище 1000 В
2. Вимоги до розподілу високовольтного і низьковольтного устаткування.
3. Вимоги до ступені захисту корпусів (оболонки) високовольтного електрообладнання .
4. Вимоги до ізоляційних відстаней високовольтного електрообладнання
5. Вимоги до пристрої захисту високовольтного електрообладнання
6. Вимоги до електричних високовольтних машин.
7. Вимоги до високовольтних трансформаторів
8. Вимоги до високовольтних кабелів
9. Вимоги до розподільних пристроїв і щитів управління високовольтного електрообладнання
10. Вимоги до розміщення високовольтного електрообладнання
11. Основні типи комутаційної високовольтної апаратури. Вимоги і призначення
12. Призначення, принцип дії, вимоги та параметри високовольтних автоматичних вимикачів
13. Конструкція високовольтних автоматичних вакуумних вимикачів. Переваги та недоліки.
14. Принцип гасіння дуги та конструкція дугогасильної камери високовольтних автоматичних вакуумних вимикачів.
15. Конструкція високовольтних автоматичних маслозаповнених вимикачів. Переваги та недоліки.
16. Принцип гасіння дуги та конструкція дугогасильної камери високовольтних автоматичних маслозаповнених вимикачів.
17. Конструкція високовольтних автоматичних елегазових вимикачів. Переваги та недоліки.
18. Принцип гасіння дуги та конструкція дугогасильної камери високовольтних автоматичних елегазових вимикачів.
19. Конструкція високовольтних автоматичних повітряних вимикачів. Переваги та недоліки.
20. Принцип гасіння дуги та конструкція дугогасильної камери високовольтних автоматичних повітряних вимикачів.
21. Порівняльний аналіз автоматичних високовольтних вимикачів різного типу.
22. Принципи побудови комплектного розподільного високовольтного обладнання

23. Конструкція шафи комплектного розподільного високовольного обладнання комплектного розподільного обладнання з одностороннім обслуговування та повітряною ізоляцією
24. Конструкція шафи комплектного розподільного обладнання з одностороннім обслуговування та елегазовою ізоляцією
25. Конструкція збірних шин комплектного розподільного високовольного обладнання
26. Основні параметри, які контролюються в шафах комплектного розподільного високовольного обладнання

6. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ОБСЛУГОВУВАННІ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

6.1. Електричні небезпеки і заходи обережності

6.1.1 Вплив електричного струму на організм людини

Протікаючи через тіло людини, електричний струм виконує наступні дії:

- термічну дію;
- електролітичну дію;
- механічну дію;
- біологічну дію.

Термічна дія струму проявляється в опіках окремих ділянок тіла, нагріві до високої температури кровоносних судин, нервів, серця, мозку та ін. органів, що знаходяться на шляху струму, що викликає в них серйозні функціональні розлади (тобто. розлади специфічної діяльності органів).

Електролітична дія струму виражається в розкладанні органічної рідини, в т. ч. крові, що супроводжується значними порушеннями її фізико-хімічного складу.

Механічна дія струму проявляється у виникненні значного тиску в кровоносних судинах і тканинах організму при випаровуванні крові та ін. рідини, а також в зміщенні і механічній напрузі їх під впливом електродинамічних сил. При цьому можуть статися важкі ушкодження різних тканин і судин.

Біологічна дія струму проявляється в роздратуванні внутрішніх біоелектричних процесів, що протікають в нормально діючому організмі і найтіснішим чином пов'язаних з його життєвими функціями. Роздратування живих тканин електричним струмом викликає в них реакцію у відповідь -

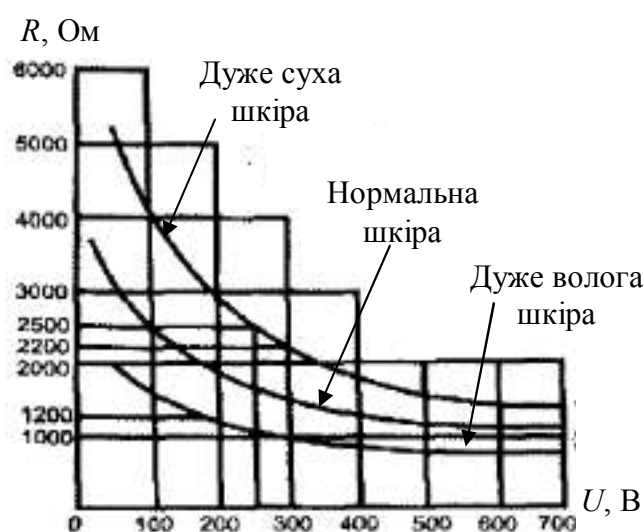


Рис. 6.1 Залежність опору тіла людини від напруги змінного струму частотою 50 Гц, якщо він протікає від руки до руки, або від руки до ноги

збудження, що є одним з основних фізіологічних процесів і що характеризується тим, що живі утворення переходять від стану відносного фізіологічного спокою в стан специфічної для них діяльності.

Зовнішній електричний струм, впливаючи з біострумом, значення якого дуже мале, може порушити нормальний характер його дії на тканини і органи людини, подавити біоструми і тим самим викликати специфічні розлади в організмі аж до його загибелі. Основним вражаючим чинником є сила електричного струму, що проходить через тіло людини.

Усі м'язи людського тіла управляються електричне, приймаючи імпульси струму від мозку. Імпульс струму викликає скорочення м'яза, і потрібно близько 10 пульсацій в секунду, щоб утримувати м'язи у скороченому стані. Тому частота 50 Гц (100 пульсацій в секунду), є достатньою для того, щоб вбити людину при прикладенні її до серцевого м'яза.

У основі своєї людське тіло є соляним розчином - електролітом) і тому чинить малий опір електричному струму. Основний опір електричному струму чинить наша шкіра, величина її опору залежить від її сухості, і вона може захистити нас від електричного шоку. Проте шкіра може ушкоджуватися при опіку і є нелінійним опором, тобто чим вище напруга, тим нижче діючий опір (рис.6.1). Це опір у різних осіб може бути різним і залежить від фізичного і емоційного стану, які впливають на здатність людського тіла витримувати електричний струм.

Поріг чутливості (коли відчувається тільки покоління або пощипування) починається при струмі 1 мА 50 Гц, а струм у 15 мА буде причиною утримання тіла під струмом із-за некерованості м'яза.. Струми вище 50 мА будуть викликати фібриляцію, а якщо струм проходить більше половини секунди, то може статися скорочення серцевого м'яза і привести до загибелі.

Постійний струм (менше 5% хвили) або висока частота змінного струму (понад 10 кГц) менш небезпечні з точки зору фібриляції, але мають інші небезпеки.

Час проходження струму є також чинником в поразці струмом. Наприклад, для зупинки серця на протязі дії струму 50 мс досить 400 мА.

У таблиці 6.1 приведені дані про проходження струму через тіло людини по дорозі "рука - рука" або "рука - нога".

Таблиця 6.1. Характер дії електроструму на організм людини

Значення струму, мА	Змінний струм промислової частоти	Постійний струм
0,0,6-1,5	Слабкий свербіж, пощипування шкіри під електродами	Не відчувається
2,0-4,0	Відчуття струму поширюється на зап'ясток, злегка зводить руку	Не відчувається
5,0-7,0	Больові відчуття посилюються в кисті руки, супроводжуючись судомами. Слабкі болі - в усій руці. Вдається здолати судорожне скорочення м'язів і розтискати руку, в якій затиснутий електрод	Слабке відчуття нагріву шкіри під електродом
8,0-10	Сильні болі і судоми в усій руці. Важко, але можна відірвати руку від електроду	Посилення відчуття нагріву шкіри
10-15	Ледве переносимі болі в усій руці з часом посилюються. Неможливо відірвати руку від електроду	Ще більше посилення відчуття нагріву, як під електродами, так і в прилеглих областях шкіри

20-25	Руки паралізує миттєво, відірвати їх від електродів неможливо. Сильні болі, дихання ускладнене	Ще більше посилення нагріву шкіри, виникнення відчуття внутрішнього нагріву. Незначні скорочення м'язів рук
25-50	Дуже сильний біль в руках і грудях. Дихання утруднене. При тривалому протіканні струму може настати параліч дихання або послаблення діяльності серця з втратою свідомості	Відчуття сильного нагріву, болі і судороги в руках. При відриві рук від електродів виникають ледве переносимі болі в результаті судорожного скорочення м'язів
50-80	Дихання паралізується через декілька секунд. Порушується робота серця. При тривалому протіканні струму може настати фібриляція серця	Відчуття дуже сильного поверхневого і внутрішнього нагріву, сильні болі в усій руці і в ділянці грудей. Утруднення дихання. Руки неможливо відірвати від електродів із-за сильних болів у момент порушення контакту
100	Фібриляція серця через 20-30 с; ще через декілька секунд - параліч дихання	Параліч дихання при тривалому протіканні струму
300	Та ж дія за менший час	Фібриляція серця через 20-30 с; ещ, через декілька секунд - параліч дихання
Більше 5000	Дихання паралізується негайно - через частки секунди. Фібриляція серця зазвичай не настає, можлива тимчасова зупинка серця в період протікання струму. При тривалому протіканні струму (декілька секунд) тяжкі опіки, руйнування тканин. Як правило, результат смертельний	

До 380 В небезпечніше змінний, а вище 500В постійний струм небезпечніший за змінний.

У чотирипровідній мережі із заземленою нейтраллю ланцюг струму, що проходить через тіло людини, включає:

- опір тіла людини ($R_{\text{л}}$)
- опір взуття ($R_{\text{вз}}$)
- опір підлоги ($R_{\text{під}}$)

Струм, що проходить через тіло людини дорівнює:

$$I_{\text{л}} = U_{\text{ф}} / (R_{\text{л}} + R_{\text{вз}} + R_{\text{під}})$$

$R_{\text{л}}$ знаходиться в межах від 3000 до 100 000 Ом

При розрахунках приймають - 1000 Ом

За несприятливих умов, коли людина доторкнулася до фази, має на ногах сире взуття, стоїть на сирій землі, значення струму дорівнює:

$$I_{\text{л}} = U_{\text{ф}} / R_{\text{л}} = 220 \text{ В} / 1000 \text{ Ом} = 220 \text{ мА} - \text{смертельно для людини.}$$

Якщо людина має на ногах непровідне взуття:

$$R_{\text{вз}} = 45 \text{ 000 Ом}$$

і стоїть на ізолюючій основі (діелектричний килимок) :

$$R_{\text{під}} = 100 \text{ 000 Ом, то:}$$

$$I_{\text{л}} = 220 / 1000 + 45 \text{ 000} + 100 \text{ 000} = 1,5 \text{ мА} - \text{струм не небезпечний для людини.}$$

З прикладу видно, що для забезпечення безпеки людей які працюють на електроустановках велике значення мають - **ізолюючі підлоги та засоби індивідуального захисту.**

Небезпечні значення напруги для життя людини:

- змінний струм 50 В;
- постійний струм 120 В

6.1.2 Дуги і ударне навантаження

Іншими небезпеками від електрики є дуга і ударна хвиля. Дуга утворюється завжди при виконанні перемикань. У пристроях, призначених для розриву струму, дуга збирається в пристрої, що вимикає, і гаситься розчіплювачем. Проте якщо відключаючий пристрій не розрахований на розрив струму (наприклад, роз'єднувач), то дуга тягнутиметься, і може не розірватися, що приведе до короткого замикання ланцюга.

Дуга, може з'явитися при розриві в повітряному проміжку і перемкнуться між фазами або на землю, викликаючи високі струми короткого замикання. Причиною цього є іонізація повітряного проміжку і, як наслідок, різке зниження опору повітряного середовища, що призводить до короткого замикання ланцюга і високого струму короткого замикання. Дія дуги, температура якої може бути майже 20000°C, призводить до пошкодження зору і серйозних поранень тіла і пошкоджень одягу. Персонал, що знаходиться поблизу, може також виявитися під впливом дуги, якщо на ньому немає відповідного захисного спорядження.

За наявності силової електричної дуги може виникнути ударна хвиля в результаті випару матеріалів, таких як мідь, вживаних в контактних системах і шинах. В результаті цього процесу мідь може розширитися в 67000 разів від свого об'єму і викликати ефект вибуху.

Енергія короткого замикання пропорційна $I^2 t$, що є мірою нанесення ушкодження в результаті короткого замикання. Таким чином, обмеження величини струму і часу, впродовж якого струм протікає, призводитиме до зниження кількості енергії, що виділяється, при короткому замиканні і, як наслідок, до зниження ушкодження і потенційної небезпеки. Це обмеження досягається використанням захисних пристроїв.

Кожна система напруг має рівень потужності короткого замикання $P_{KЗ}$ в $[MB \cdot A]$ та відповідний струм короткого замикання $I_{KЗ}$ в $[kA]$, які пов'язані наступним співвідношенням:

$$I_{KЗ}[kA] = \frac{P_{KЗ}[MB \cdot A]}{\sqrt{3} \cdot U[kB]} \quad (6.1)$$

Автоматичні вимикачі та шини розподілюючих щитів розраховані на визначені рівні струму та потужності короткого замикання. Звичайно високовольтні шини та автоматичні вимикачі для напруги 11 кВ мають рівень потужності короткого замикання 250 МВ·В, то струм короткого замикання складає $I_{KЗ} = \frac{250}{\sqrt{3} \cdot 11} \approx 13$ кА. Тоді як низьковольтні шини та автомати для напруги

415 В мають рівень потужності короткого замикання 31 МВ, тому струм короткого замикання складає $I_{K3} = \frac{31}{\sqrt{3} \cdot 0,415} \approx 43$ кА. Якщо прийняти, що струм дуги дорівнює струму короткого замикання, то енергія дуги для високовольтного випадку складе $(13 \cdot 10^3)^2 \cdot t \approx 169 \cdot 10^6 \cdot t$ [А·с], а для низьковольтного випадку – $(43 \cdot 10^3)^2 \cdot t \approx 1849 \cdot 10^6 \cdot t$ [А·с], що приблизно в 11 разів вище (а значить і руйнівна сила дуги) ніж в високовольтному випадку.

6.1.3 Електрозахисті засоби

При обслуговуванні електричного обладнання необхідне використовувати засоби захисту від ураження електричним струмом, від впливу електричного поля, а також індивідуальні засоби захисту. Основні ізолюючі електрозахисні засоби наведені в табл.6.2, а основні додаткові електрозахисні засоби наведені в табл.6.3.

Таблиця 6.2 – Основні електрозахисні засоби при обслуговуванні електрообладнання

До 1000 В	Выше 1000В
Ізолюючі штанги	Ізолюючі штанги
Ізолюючі кліщі	Ізолюючі кліщі
Електровимірювальні кліщі	Електровимірювальні кліщі
Указники напруги	Указники напруги
Діелектричні рукавички Інструмент з ізоляційним покриттям	Пристрої для забезпечення безпечної роботи при проведенні тестування ті вимірювань в електрообладнанні (указники напруги та фазування, указники пошкоджених кабелів та т.п.)

Таблиця 6.3 – Додаткові електрозахисні засоби при обслуговуванні електрообладнання

До 1000 В	Выше 1000В
	Діелектричні рукавички
Діелектричне взуття	Діелектричне взуття
Діелектричні килимки	Діелектричні килимки
Ізолюючі підставки	Ізолюючі підставки
Ізолюючі накладки	Ізолюючі накладки
Ізолюючі ковпаки	Ізолюючі ковпаки
Сигналізатори напруги	Сигналізатори напруги Штанги для вирівнювання та переносу потенціалу.
Захисні загородження (щити, ширми)	Захисні загородження (щити, ширми)
Переносні заземлення	Переносні заземлення
Плакати та знаки безпеки	Плакати та знаки безпеки

Розглянемо стандартні засоби індивідуального захисту (PPE – personal protective equipment) більш детально (рис.6.2).



Рис.6.2 Засоби індивідуального захисту

1 – захисна каска; 2 захисна маска; 3 – захисні окуляри;
4 – навушники; 5 – індивідуальний одяг; 6 – рукавички; 7 - взуття

1. Захисна каска (Head gear, защитная каска).

Захисні каски призначені для захисту голови робітника від механічних пошкоджень, від воли та агресивної рідини, а також від поразки електричним струмом при випадковому дотиканні струмопровідних частин, які знаходяться під високою напругою. Каски складаються з корпусу, внутрішньої оснастки (амортизатора на несучій смуги) і підборідного реміння. Для виготовлення каски використовують нетоксичні, сталі до дії кислот, мінеральних масел, бензину та дезінфікуючих речовин. Нормативний термін експлуатації касок визначається в технічній документації. Після закінчення терміну експлуатації каски вилучаються з експлуатації.



Перед використанням захисної каски її необхідно ретельно оглянути. Не можливо використовувати захисні каски, які мають порушення у вигляді тріщин та вм'ятин, або при порушенні цілісності внутрішньої оснастки.

Періодичність тестування касок складає 6 місяців.

2. Захисна маска обличчя (Face mask, Защитный щиток) та

3. Захисні окуляри (Goggles, Защитные очки).

Вони призначені для захисту очей та обличчя від сліпучого світла електричної дуги, ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювання, твердих часток та пилі, брызів агресивної рідини та розплавленого металу.

Рекомендується використання захисних окулярів та щитків закритого типу з непрямою вентиляцією і світлофільтрами та



захисні щитки зі світлофільтрами, удароміцним, хімічно стійким та сітчастим корпусом. Конструкція захисних щитків повинна забезпечити надійне кріплення скла і мати змогу їх заміни без використання спеціального інструмента. Поверхня скла окулярів та захисної маски повинна бути тонована.

Перед використанням захисні окуляри та захисні маски необхідно ретельно обстежити. Не можливо використовувати захисні маски та окуляри які мають тріщини або шкрябання чи інші дефекти. При виявленні таких дефектів захисні маски та захисні окуляри необхідно замінити. Для попередження запотівання скла при тривалій роботі внутрішню поверхню скла необхідно змазати спеціальною змазкою. При забрудненні захисні щитки та захисні окуляри необхідно промити теплим мильним розчином, потім прополоскати та обтерти м'якою тканиною.

Для предохранения запотевания стекол защитных очков при длительной работе их внутреннюю поверхность необходимо смазать специальной смазкой.

При загрязнении защитные очки необходимо промыть теплым мыльным раствором, а затем прополоскать и вытереть мягкой тканью.

Періодичність тестування захисних окулярів та захисних щитків складає 6 місяців.

4. Навушники (Ear muffs, Наушники)

Вони призначені для захисту слуху при звукової дії дуги короткого замикання. Будь які стандартні засоби захисту слуху можуть бути використані для цієї мети. Вони підрозділяються на вкладиші (одноразового або багаторазового використання) та навушники (можуть бути змонтовані на захисних касках).



Навушники мають більшу ефективність захисту слуху, але мають деякі недоліки, наприклад, виникнення болю при тривалому використанні.

Періодичність тестування складає 12 місяців.

5. Захисний одяг (Coveralls, защитная одежда)

До захисного одягу відносять спеціальні комбінезони, комбінезони з нагрудниками, сорочки з довгим рукавом, ізолювані рукава. Захисний одяг повинен задовольняти чи бути вище рівню загрози при виникненні дури та рівню ударної напруги. Захисний одяг повинний бути закріплений за конкретною персоною. Захисний одяг необхідне періодично чистити та ремонтувати. Допускається проводити суху чистку одягу та її ремонт. Забороняється при ремонті захисного одягу використовувати електропровідний матеріал та тканину загального використання. Кожний індивідуальний комплект одягу повинний бути пронумерований. Забороняється працювати в захисному одягу під дощем без плащу, або іншого захисту від намокання.



Періодичність тестування захисного одягу складає 6 місяців.

6. Діелектричні рукавички (Insulating gloves, Диэлектрические печатки)

Діелектричні рукавички призначені для захисту рук від поразки електричним струмом. Діелектричні рукавички виконують з діелектричної гуми, без швів, або зі швом, п'ятипалі або двохпалі. Довжина рукавичок повинна бути не менш 350 мм. Розмір рукавичок дозволяє вдягати під них трикотажні рукавички для захисту від холоду. Ширина на нижньому краю рукавичок повинна дозволяти натягувати їх на рукава верхнього одягу. При виконанні робіт краї рукавичок не можна загортати. .



Перед використанням діелектричних рукавичок їх необхідне ретельно обстежити. Вони повинні бути сухими і чистими без наявності в них вологи, не мати пошкоджень та проколів. Діелектричні рукавички необхідне періодично промивати содовим або мильним розчином та ретельно висушити.

Періодичність тестування діелектричних рукавичок складає 12 місяців.

7. Захисне взуття (Safety shoes, Защитная обувь)

Захисне взуття призначене для захисту працівника від поразки електричним струмом та напруги шагу. Спеціальне діелектричне взуття (калоші або боти) використовують як додаткові захисні засоби в закритих приміщеннях, або при відсутності осадків в відкритому електрообладнанні. Калоші використовують при обслуговуванні електрообладнання з напругою до 1000 В, а боти – з напругою вище 1000 В. Захисне взуття повинне відрізнятися за кольором від загального гумового взуття. Боти повинні мати відвороти, а їх висота повинна бути не менш 160 мм.



Перед використанням захисне взуття необхідне ретельно обстежити. Вони не повинні мати дефекти: наявності пошкоджень, тріщин, відслонення деталей, сторонніх предметів та ін.

Періодичність тестування калош складає 12 місяців, ботів – 36 місяців.

8. Ковдри діелектричні та підставки ізолюючі (Dielectric carpets and insulating stands, ковры диэлектрические и подставки изолирующие)

Вони використовуються як додаткові засоби електробезпеки на обладнанні з напругою до і вище 1000 В.

Ковдри використовують в закритих приміщеннях, окрім вологих приміщень, підставки використовують в сирих та забруднених приміщеннях. Ковдри виготовляють з гуми однорідного кольору з рифленою поверхнею товщиною 6 ± 1 мм, довжиною від 500 до 8000 мм та шириною від 500 до 1200 мм.



Ізолююча підставка уявляє собою настил, який закріплений на додаткових ізоляторах висотою не менш 70 мм. Настил розміром не менш 500x500 мм виготовляють з добре висушених струганих дерев'яних дошок без сучків. Відстань між планками повинна бути 10-30 мм. Планки повинні з'єднуватися без використання металевих предметів. Настил повинний бути окрашений з усіх сторін.

Періодичність тестування складає 12 місяців

9. Ізолюючі накладання (Insulating linings, изолирующие накладки)

Ізолюючі накладання використовують в електрообладнанні з напругою до 20 кВ для унеможливлення випадкового доторкання до струмопровідних частин у тих випадках, коли не можливо загородити робоче місце щитами. Їх виготовляють з високо міцного діелектричного матеріалу. Конструкція накладення повинна дозволяти повністю закрити струмопровідні частини. В електрообладнанні вище 1000 В використовують тільки жорсткі накладання.



Встановлення ізолюючих накладень на струмопровідні частини електрообладнання з напругою вище 1000 В повинно виконуватися двома робітниками з використанням діелектричних рукавичок, ізолюючих штанг або кліщів. Перед використанням накладання очищують від бруду та перевіряють на відсутність тріщин, розривів та інших дефектів. Діелектричні накладання після їх утримання при негативній температурі необхідно витримати при температурі $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ не менш 24 годин.

Періодичність тестування складає 6 місяців

10. Ковпаки ізолюючі (insulating caps, колпаки изолирующие).

Ізолюючі ковпаки призначені для встановлення на жили кабелів та ножах розчіплювачів в електрообладнанні з напругою до 10 кВ, коли не має можливості накласти переносне заземлення при проведенні ремонту чи тестування. Конструкція ковпаків повинна дозволяти їх надійне закріплення на жилах кабелів, а також встановлення на ножі розчіплювачів за допомогою оперативної штанги. Ковпаки виготовляють з діелектричної гуми або інших діелектричних матеріалів.



Перед використанням діелектричні ковпаки необхідно перевірити на відсутність дефектів. При встановленні ковпаків необхідно перевірити відсутність напруги на жилах кабелю або ножах розчіплювача. Встановлення та зняття ізолюючих ковпаків повинне виконуватися двома працівниками з використанням ізолюючої штанги та діелектричних рукавичок.

Періодичність тестування складає 6 місяців

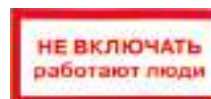
11. Плакати та знаки небезпеки (Safety signs, плакаты и знаки безопасности)

Плакати та знаки небезпеки використовують для заборони роботи з комутаційними апаратами, включення яких може подати напругу на місце роботи; для попередження о безпеки наближення до струмопровідних частин, які знаходяться під напругою; для дозволу відповідних дій тільки при виконанні конкретних вимог техніки безпеки.

Плакати та знаки небезпеки бувають:

Заборонний плакат чи знак (Danger sign, запрещающий знак).

Такі знаки забороняють відповідні дії з комутаційними апаратами, помилкове включення яких може привести до попадання напруги на місце роботи, а також для заборони



пересування без спеціальних засобів захисту. Такі знаки виконуються червоними літерами на білому фоні.

Застережливий плакат чи знак (Warning sign, предупреждающий знак)

Такі знаки попереджають о небезпеки при наближенні до струмопровідних частин, які знаходяться під напругою, та пересування без спеціальних засобів захисту. Такі знаки виконуються чорними буквами на білому або жовтому фоні.



Вказівні плакати чи знаки (Informative signs, указательный плакат или знак)

Такі знаки вказують місцеположення різних об'єктів та пристроїв. Виконуються білими літерами на синьому фоні.

Наказуючий плакат чи знак (Notice sign, предписывающий плакат или знак).

Такі знаки встановлюють для дозволу виконання відповідних дій при виконанні конкретних умов безпеки. Виконуються чорними літерами на білому фоні.

За характером використання плакати та знаки безпеки можуть бути постійними та переносними. Вони виконуються на основі електроізоляційних матеріалів: склопластика, текстоліта, гетинакса та ін. Постійні знаки та плакати електробезпеки наносять на поверхню опор високовольтних ліній, дверців камер та ін. красками за допомогою трафаретів, або з використанням самоклеючої плівки.

6.1.4 Заземлення. Принципи і ефективність заземлення.

Поняття **заземлений**, означає підключений до основної маси заземлення об'єкт таким чином, що це всякий раз забезпечуватиме негайне відведення електричної енергії без **небезпеки** для об'єкту.

Звідси, витікає, що якщо устаткування заземлене таким чином, то для проходження струму через тіло людини буде дуже високий опір і, отже, через нього протікатиме порівняно слабкий струм, усуваючи можливість електричного удару.

По призначенню розділяють наступні види заземлення:

- грозозахисне заземлення – для захисту споруд, електрообладнання від прямих ударів блискавки;
- робоче заземлення – для забезпечення нормальної роботи електрообладнання або його елементів в вибраних режимах (заземлення нейтралей силових трансформаторів в мережах 110 кВ та вище, заземлення нейтралей вимірювальних трансформаторів напруги в мережах до 35 кВ та ін.);

- захисне заземлення – для забезпечення безпечних умов обслуговування електрообладнання (заземлення неізовльованих металевих частин машин і апаратів, які можуть опазатися під напругою при порушенні ізоляції або коротких замикань, заземлення станин, кожухів та ін.)

Заземляючий пристрій характеризується величиною його опору, яке визначається відношенням напруги відносно землі до струму, який проходить через нього. В загальному випадку опір заземляючого пристрою складається :

- з опору заземляючих провідників;
- опору металевих частин заземляча;
- перехідного опору між заземлячем та ґрунтом;

Система живлення в багатьох зарубіжних країнах (але не в усіх) вимагає, щоб нейтраль обмоток низької напруги була глухо заземлена. Це сприяє тому, що фазна напруга (лінії відносно землі) не перевищує 240 вольт при лінійному 415 вольт. Проте це являється також і недоліком, коли будь-яка незаземлена металева конструкція, що контактує з лінійним провідником, матиме 240 вольт відносно будь-якої заземленої металевої конструкції, що знаходиться поблизу і що несе нульовий потенціал.

Використання заземленої нейтралі дає можливість застосувати захисний пристрій визначення і відключення несправної фази, що замкнулася на землю, і запобігти таким чином руйнуванню ізоляції з наступним міжфазовим замиканням (це може викликати великі наслідки в розподілюючих мережах високої напруги).

В умовах несправного заземлення виявляється, що зона устаткування з несправним заземленням знаходитиметься під фазовою напругою і тому будь-хто, що стоїть в цій зоні може потрапити під цю напругу при пробіі фази (рис.6.3 а). Якщо ж людина і устаткування матимуть однаковий потенціал (справне заземлення), то ніякий струм через нього не пройде. Тому заземлення є життєво важливим елементом безпеки, як для людини, так і для устаткування.

Ефективність заземлення може розглядатися по трьох основних напрямках:

- Оберігання поверхні апаратури і провідників від накопичення потенціалу, який є небезпечним з різних причин для довкілля. Там, де є ризик

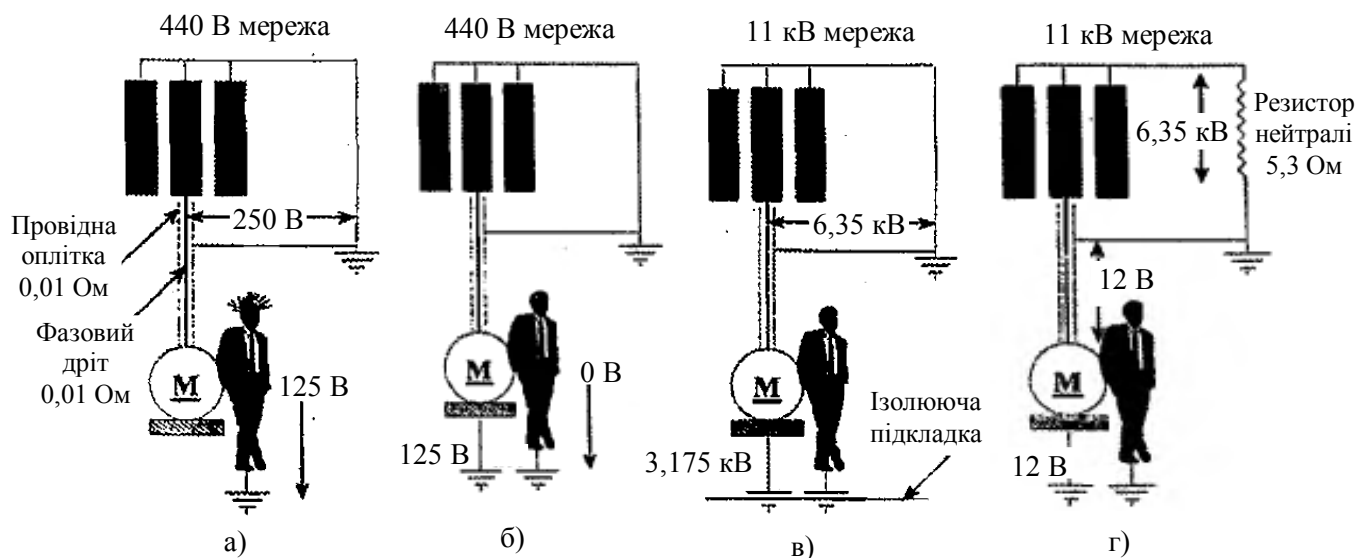


Рис.6.3 Ймовірність удару струмом людини при різних варіантах заземлення обладнання

відносного вибуху, може виникнути небезпека навіть при дуже малому потенціалі.

- Воно повинне дозволити достатній кількості струму пройти безпечно і забезпечити спрацьовування пристроїв перевантаження по струму або інших пристроїв захисту, включаючи захист по витоку на землю.
- Воно може бути потрібне для пригнічення небезпечних рівнів потенціалу відносно землі, які можуть бути причиною неправильного спрацьовування схем захисту або управління і навіть пошкодження їх, а також збільшення ризику пожежі і вибуху в місцях, віддалених від полумок.

У практичних ситуаціях, з не знеструмленим електроустаткуванням, яке експлуатується, заземлення дає персоналу деяку міру захисту від поверхонь апаратури, які опиняються під напругою унаслідок короткого замикання, забезпечуючи нижчий опір ланцюга "на землю" чим через людське тіло і викликаючи швидке спрацьовування захисних пристроїв під дією короткого замикання.

Якщо справне високовольтне устаткування знеструмлене і роз'єднане, то заземлення такого устаткування/ланцюгів забезпечує розрядку будь-якого електричного заряду, що накопичився, що властиво кабелям фідерів, що мають деяку ємність. Крім того, таке заземлення сприятиме захисту ланцюгів від накопичення заряду, наприклад, внаслідок дії індуктивностей від паралельних, дуже близько розташованих кабелів, що знаходяться під струмом (рис.6.4).

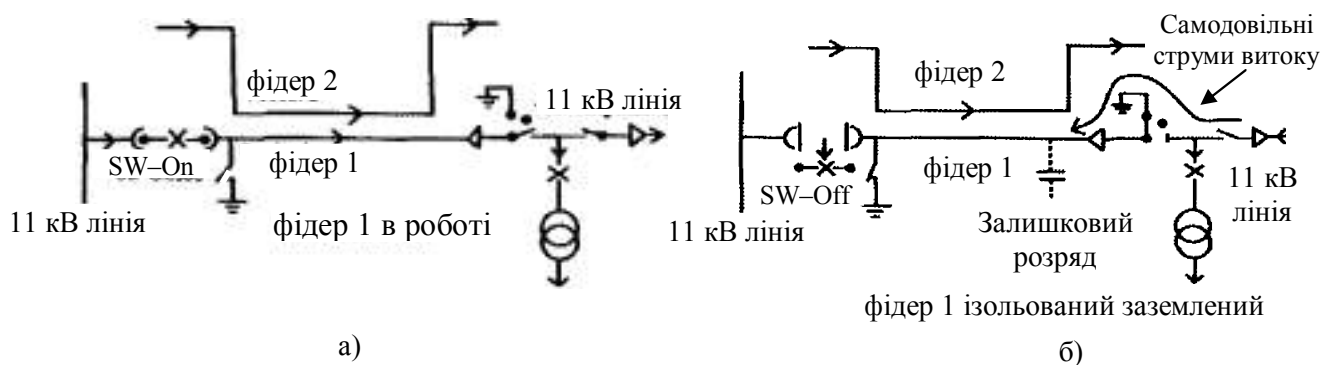


Рис.6.4 Захист фідерної лінії від накопичення залишкових зарядів шляхом заземлення:
а – високовольтна лінія 1 в роботі; б - високовольтна лінія 1 ізолювана та заземлена

6.1.4.1 Допустимі значення опору заземлення

При опорі заземлення наближеного до нуля, на захищаємих об'єктах не можуть виникнути значні потенціали як в наслідку ударів блискавки, так і при порушенні ізоляції, але вартість такого устаткування значна. Тому для кожного виду заземлень встановлені допустимі значення опору.

При порушенні фазової ізоляції в мережах з глухим заземленням нейтралі (наприклад, у вимикача, кожух якого заземлений), на поверхні землі можуть виникнути високі напруги: шагова напруга $U_{ШАГ}$ або напруга доторкання $U_{ДОТ}$. При короткочасної дії (коли система захисту швидко відключає коротке однофазне замикання на землю) людина здатна видержати таку високу напругу.

Для зменшення величин $U_{ШАГ}$ та $U_{ДОТ}$ при проектуванні і виконанні заземлення необхідно більш рівномірно розподілити потенціал по площі розподільного пристрою. Це досягається відповідним розміщенням по площі електроустановки електродів (труб, полос, кутників) у вигляді контуру, яких охоплює всю площу електроустановки.

Правила установки електроустановки регламентують наступні значення опору заземлюючих пристроїв:

- В установці з глухим заземленням нейтралі, тобто при струмах замикання на землю не більш 500 А, опір заземлення R_S повинен бути менш 0,5 Ом.
- В установці вище 1000 В з незаземленою нейтраллю $R_S \leq \frac{250}{I}$, де $I = 3U_{\phi}\omega C$ - ємнісний струм замикання на землю всій мережі даної напруги, яка не має апаратів, що компенсують ємнісний струм.
- В установці з незаземленою нейтраллю без апаратів, що компенсують ємнісний струм, якщо заземлюючий пристрій використовується для електроустановок до 1000 В, тоді $R_S \leq \frac{250}{I}$.

В установці з компенсацією ємнісних струмів струмом I для розрахунку є залишковий, або некомпенсований струм замикання на землю при відключенні найпотужнішого з компенсуючих апаратів, але не менш 30 А.

Для заземлення в схемах грозозахисту значення опору визначається системою захисту і лежить в межах $R_S \approx 5 - 30$ Ом. В електроустановках до 1000 В значення R_S не повинне перевищувати 4 Ом.

В будь-якому випадку значення опору заземлюючого пристрою не повинне бути вище значення опору ґрунту.

6.2 Правила по високовольтній безпеці

Правила, які регламентують усі-можливі роботи, що виконуються на високовольтних системах будь-якими установами з метою забезпечення безпеки усіх, хто може виконувати ці роботи викладені в наступних документах: :

- Electricity at Work Regulations 1989
- Health and Safety at Work Act
- I.E.E. 2nd Edition Recommendation for the Electrical and Electronic Equipment of Mobile and Fixed Installations.
- I.E.E. 6th Edition Regulations for the electrical and Electronic Equipment of ships. Regulation for Electrical Installations, Maritime Installations (N.V.E.).

Цими правилами покривається широкий діапазон високовольтних систем, типів розподільних щитів, персоналу суден або платформ. При цьому вони є тільки загальними правилами, які формують вимоги по основах безпеки, як це видно з перерахованих документів. Вони є вичерпним матеріалом за правилами високовольтної безпеки.

При роботі або поблизу високовольтного устаткування усі службовці і контрактики, повинні виконувати свої дії безпечним, належним способом. Там, де не існує таких правил, або устаткування знаходиться під оперативним управлінням закладу, повинні строго виконуватися наступні правила. Їх невиконання повинне каратися в дисциплінарному порядку.

Розглянемо ці правила на прикладі видання №3, яке діє з 01.01.2002 р та включає до себе п'ять розділів (А, В, С, D, E) та два додатка [2].

6.2.1 Загальні положення (розділ А).

Увесь персонал, пов'язаний з проведенням робіт у високовольтних системах і її апаратурі повинен виконувати роботу відповідно до цих правил і іншими що мають відношення до безпеки. Ігнорування цих правил є неприйнятним.

Не повинно бути ніяких змін цих правил. Якщо правило не може бути застосоване до системи або частини апаратури, то формальний запит на ревізію правила має бути зроблений інженером електриком. Будь-які зміни, продиктовані вищевикладеною процедурою, мають бути опубліковані так, щоб увесь персонал, що має до цього відношення, був обізнаний про ці зміни. Мають бути встановлена область і період їх застосування, а також усі процедури виконання.

Копії цих правил мають бути видані усім особам, пов'язаним з роботою або обслуговуванням, систем під розпис про отримання їх цими особами.

Усі особи, які можуть бути пов'язані з роботою в розподільних системах, мають бути, обізнані в частині поразок електричним струмом. Застережливі інструкції, мають бути виставлені в підстанціях і розподільних щитах.

6.2.2 Терміни і визначення (розділ В).

Схвалений – вид або форма, яка санкціонована для застосування інженером-електриком.

Live – обладнання яке знаходиться під напругою.

Dead - обладнання яке не знаходиться під напругою, і від'єднане від усіх джерел електричної енергії.

Роз'єднаний (isolated). – обладнання елемент електричного устаткування, яке від'єднано і відокремлено від кожного джерела електроенергії таким шляхом, що це від'єднання і відділення зберігається.

Висока напруга (HV – high voltage)– напруга, що перевищує 1000 вольт змінного струму і 1500 вольт постійного струму.

Високовольтна апаратура (HV – equipment) – усі апарати, устаткування або провідники, що працюють зазвичай при напрузі більше 1000 вольт.

Інженер-електрик – старший інженер-електрик, призначений письмовим наказом компанії як відповідальний за трактування і дотримання правил безпеки.

Старша уповноважена особа (senior authorized person) – уповноважена особа, яка призначається письмово інженером - електриком для виконання усіх наказаних цими правилами обов'язків.

Уповноважена особа (authorized person) - ця особа, письмово призначена інженером-електриком для виконання спеціальних обов'язків, наказаних цими правилами.

Компетентна особа (competent person) – це людина, яке має достатні технічні знання і досвід по своїх функціональних обов'язках, що дозволить йому уникати небезпеки. Уповноважена особа зобов'язана видати роботу і переконатися, що усі особи, що залучаються до неї достатньо компетентні.

Допуск до роботи.(PTW- Permit -to-work) - це форма заяви, підписана і видана Уповноваженою особою компетентній особі, при наряді на роботу, виконуваною на- або в безпосередній близькості від високовольтної апаратури, дає йому зведення про об'єм роботи, уточнює яка апаратура знеструмлена, відокремлена від струмопровідних провідників, розряджена і заземлена і які небезпеки можуть бути недалеко від місця роботи.

Допуск до блокування.(PTL – Permit to-lockout) – це форма заяви, підписана і видана Уповноваженою особою іншій уповноваженій особі у зв'язку з необхідністю та послідовності виконання процедури Lockout/Tagout для забезпечення безпеки персоналу при виконанні ремонту чи технічного обслуговування електрообладнання.

Система захисного блокування (Lockout/Tagout або LOTO) – система, яка призначена для забезпечення безпеки персоналу при виконанні ремонту чи технічного обслуговування електрообладнання. Процедура передбачає відключення та неможливість подання живлення до електрообладнання, захисне блокування джерел енергії спеціалізованим обладнанням та вивішування попереджувальних бирок або знаків.

Система LOTO складається з наступних елементів:

- Блокувальний пристрій, який призначений для надійної фіксації джерела енергії у необхідному положенні;
- Бирка, яка містить інформацію о виді роботи, часу початку та часу завершення роботи, уповноваженій особі та ін.
- Навісний замок, який призначений для запирання блокувального пристрою, або безпосереднє джерела енергії (при наявності вбудованого блокувального пристрою).

Як додатковий елемент системи LOTO можуть використовуватися:

- Захисне накладання (хасп), яка використовується у випадку проведення робіт декількома працівниками одночасно і дозволяє кожному працівнику блокувати обладнання персональним замком.
- Груповий бокс, який дозволяє зменшити кількість необхідних замків при проведенні роботи.
- Блокувальна (замкова, бирочна) станція, яка призначена для упорядкованого зберігання пристроїв блокування.



Санкція на тестування (SFT – sanction for test) - це форма заяви, підписана і видана Уповноваженою особою іншій уповноваженій особі у зв'язку з перевіркою високовольтної апаратури, така, що дає відомості приймаючому о том, які апарати мають бути протестовані і умови, при яких тест повинен виконуватися.

Обмеження доступу. – це форма, що видається уповноваженою особою компетентній особі, визначає межі роботи, яка виконуватиметься зблизька, але не на високовольтній апаратурі.

Попередження. – це зауваження по застереженню від окремих видів апаратів.

Небезпека - це напис, що закликає до підвищеної уваги до небезпеки, що відноситься до окремих апаратів, до яких вона прикріплена.

Головне заземлення. - це з'єднання із землею, вживане з метою забезпечення безпеки при роботі перед тим, як буде виданий дозвіл на роботу або санкція на тестування, підтверджені документально.

Додаткове заземлення. - це заземлення, що підключається до апаратів після встановлення головного заземлення, зазвичай підводиться до місця роботи, якщо немає зв'язків з головним контуром заземлення.

Заземлення. - підключається до головної маси землі у такий спосіб, щоб забезпечити у будь-який момент швидку і безпечну розрядку електроенергії.

Сейф для ключів (Key safe) – це пристрій, що забезпечує надійне зберігання ключів, використовуваних для замикання засобів роз'єднання, заземлення і інших пристроїв безпеки в системі LOTO.

Охоронний замок - це замок, який використовується для охорони засобів роз'єднання, пристроїв безпеки і ланцюгів заземлення і який відрізняється своєю унікальністю від інших замків, які використовуються у системі LOTO.

6.2.3 Забезпечення безпеки при роботі з високовольтною апаратурою (Розділ С)

С1. Робота з високовольтними апаратами.

Ніхто не повинен виконувати роботу будь-якого типу на будь-якій частині високовольтних апаратів, якщо не виконані наступні заходи:

- a) Знеструмленість.
- b) Роз'єднання і виконання усіх кроків по від'єднанню від провідників під напругою і без напруги, що можуть виявитися під напругою.
- c) Роз'єднання і від'єднання від усіх трансформаторів напруги, які зазвичай можуть до них підключатися, за винятком болтових з'єднань;
- d) Заземлення усіх пристроїв роз'єднання джерел високовольтної напруги від цих апаратів і прикріплення табличок попередження.
- e) Загородження екраном там, де необхідно запобігти небезпеці з виставлянням попереджень і написів про небезпеку.
- f) Проведення робіт з виданим допуском до роботи або санкцією на тестування. Має бути також особа, що повністю обізнана про характер і об'єм виконуваної роботи і є свідком того, що апаратура відключена в місці роботи.

С2. Чистота і забарвлення металевих; покриттів заземлення і бортових секцій підстанцій мають бути виконані по інструкції "Обмеження доступу".

С3. Експлуатація розподільних щитів.

а) Звичайне включення або відключення високовольтних апаратів повинні здійснюватися або Уповноваженою особою або компетентним персоналом, що використовує устаткування за цільовим призначенням і цей персонал має бути в курсі своїх обов'язків.

б) При аварійних високовольтних перемиканнях відключення живлення може бути виконане будь-якою компетентною особою.

с) За винятком правила вищестоящого параграфу високовольтне перемикання повинне виконуватися уповноваженою на те особою або компетентною особою, що отримала інструкції у уповноваженої особи.

д) Будь-яке повідомлення, пов'язане з експлуатацією високовольтної системи і яке передається по телефону/радіо повинно бути повністю повторено таким, що приймає для підтвердження того, що повідомлення прийняте в точності.

е) Відновлення або відключення живлення по сигналах або після узгодженого тимчасового інтервалу забороняється.

С4. Висувна апаратура.

Високовольтні апарати, які роз'єднані і видалені з нормального робочого положення, можуть оброблятися без допуску до роботи або санкції на тестування, за умови:

а) Апарат розряджений.

б) Апарат захищений за допомогою загороджень і замків від відновлення живлення. с) Доступ до дротів високої напруги на розподільному щиті неможливий.

С5. Розмикання.

Усі щитові обгороджування проходів, не потрібні для негайної роботи або експлуатації" мають бути замкнуті. (Виключення: для окремих типів розподільних щитів доступи до обгороджувань обмежуються до тих пір, поки автомат знаходиться в панелі розподільного щита. У цих випадках є прийнятним або замкнути двері панелі розподільного щита, або замкнути ручний механізм, що повинне запобігти виїмці автомата до тих пір, поки це не знадобиться).

С6. Захисне устаткування.

а) Жодне захисне устаткування, пов'язане з апаратурою високого напруги і що є частиною системи, не повинне регулюватися, вставлятися або вийматися для введення/виводу а експлуатацію без санкції інженера-електрика.

б) Ніяке устаткування не повинне вводиться в експлуатацію (після модифікації) до тих пір, поки захисні пристрої не будуть приведені в хороший робочий стан.

С7. Перевірка ізоляції.

Усі високовольтні апарати, які є новими або піддавалися істотному техобслуговуванню або переробці, мають бути випробувані високою напругою відповідно до ескізів, письмово схвалених інженером-електриком.

С8. Несправність живлення.

Під час несправностей, пов'язаних з живленням, усі апарати, устаткування і провідники повинні розглядатися, такими що вони знаходяться під напругою до тих пір, поки вони не роз'єднані і не визнані доказово, що вони знеструмлені.

С9. Вхід у приміщення, що містять високовольтну апаратуру.

а) Приміщення підстанцій і інші щитові, такі, що містять високовольтну апаратуру повинні замикатися за виключенням, коли необхідно увійти або пройти.

б) Ключі, що дають нормальний доступ до подібних приміщень мають бути доступними тільки для уповноважених осіб.

с) Ніхто, окрім уповноваженого або компетентної особи, що знаходиться під безпосереднім наглядом уповноваженої особи, яка має постійно бути присутнє, не повинен входити в будь-яку підстанцію або інше приміщення, в якій можливий дотик до висунених високовольтних провідників.

д) Доступ в підстанції або в інші приміщення, що містять високовольтні апарати, обмежується рівнем уповноважених осіб або інших осіб, але у супроводі уповноваженої особи.

С10. Заземлення.

а) Головні ланцюги заземлення повинні створюватися і демонтуватися тільки особою, уповноваженим це виконувати або компетентною особою у присутності уповноваженого і по його інструкціях.

б) Якщо високовольтна апаратура знеструмлена і роз'єднана, то перед заземленням дротів необхідно переконатися в зструмленості за допомогою схваленого потенціометра - індикатора, який має бути протестований як до так і після використання, щоб переконатися в його хорошому робочому стані.

с) Там, де це практично можливо, контур заземлення головного ланцюга повинен використовуватися через автоматичні вимикачі або заземляючі вимикачі.

д) Перед підключенням має бути апробований включаючий пристрій, щоб заземлення було успішним. Після включення автомат має бути зафіксований (защипнутий) в положенні заземлення, а механізм відключення має бути поза оперативною дією з додатком попереджувальних написів.

е) Додаткові заземлення можуть встановлюватися на робочих місцях після видачі дозволу на роботу або санкції на випробування компетентною особою, призначеною по роботі або уповноваженою особою, що видає допуск або санкцію по запиту компетентної особи.

ф) Ланцюг головного заземлення, використовуваний в робочому місці, може бути, для полегшення роботи, видалений і замінений тимчасовим, вказаним в допуску до роботи. Якщо це є головним ланцюгом заземлення, приєднаним до апаратів, то уповноважений, що видав дозвіл на роботу, повинен залишитися на місці роботи і бути відповідальним за безпеку усіх зайнятих роботою, поки головне заземлення видалене. Ніякої іншої одночасної роботи не повинно бути дозволено на будь-якій частині ланцюга впродовж терміну дії допуску до роботи.

C11. Таблички і написи.

Вивіски про заборонну і застереження про небезпеку, повинні забезпечуватися для усіх високовольтних апаратів і встановлюватися при допуску до роботи або санкції на тестування і повинні акцентувати увагу на заборону наближення або про небезпеку.

C12. Робота з високовольтними кабелями.

а) Ніхто не повинен торкатися до ізоляції, яка покриває або підтримує будь-який дріт з високою напругою, якщо цей дріт не заземлений.

б) Перед видачею допуску до роботи особа, уповноважена для видачі дозволів повинно визначити кабель, який оброблятиметься й переконатися в знеструмленості робочого місця. Інакше повинно передбачатися, що усі кабелі знаходяться під високою напругою до тих пір, поки не буде доведено зворотне.

с) Перед видачею дозволу на роботу, пов'язану з обробленням і порушенням ізоляції кабелю високої напруги (за винятком випадків, вказаних нижче), особа, яка видає дозвіл повинно притягнути виконавця, який має допуск до роботи: :

(i) Перевірити кабельні написи (маркування).

(ii) Оглянути кабельну трасу від місця роботи до місця, в якому апаратура чітко визначається постійним маркуванням так, щоб не було ніяких сумнівів в ідентифікації кабелю. Де (ii) не здійснимо, то:

(iii) Кабель повинен ідентифікуватися способом сигнальної ін'єкції (signal injection methods); якщо, можливо, кабель має бути проколотий схваленим проколюючим пістолетом (gun), по можливості ближче до робочого місця. Якщо можливо, то кабель має бути надрізаний в місці пістолетного проколу, Тестування повинне підтвердити, що надрізаний кабель є тим самим. Ця операція повинна виконуватися згідно з санкціями по тестуванню.

(iv) Якщо робота виконується на кабелях, у яких на провідниках і оболонках можуть бути наведення напруги від не знеструмленого устаткування, що знаходиться поблизу, то там, де можливо, дроти і оболонки мають бути заземлені, а персонал повинен використовувати належне захисне устаткування (PPE - personal protective equipment).

(v) Там, де вищезгадані процедури практично неможливі, мають бути розписані і схвалені інженером-електриком спеціальні процедури.

C13. Робота на трансформаторах.

Коли робота виконується на будь-яких з'єднаннях, включаючи точки роз'єднання на обмотках трансформатора, то усі кінці, незалежно від величини напруги, мають бути від'єднанні. Головний контур землі має бути приєднаний до точок роз'єднання з боку джерела високовольтної напруги. Низьковольтні вузли роз'єднання мають бути зафіксовані в розімкненому стані.

C14. Робота з головними кільцевими установками (Ring Main Units).

а) Конструкція головних кільцевих установок зазвичай перешкоджає застосуванню індикаторів потенціометрів перед заземленням. Це надзвичайно важливо, щоб до того як виконати якесь заземлення, необхідно спочатку від'єднати віддалений кінець.

b) Схема системи має бути перевірена до початку будь-яких робіт, і на сторінці позначок мають бути прочитані схвалені процедури перемикачів.

c) Усе. роботи і виключення/включення на головних кільцевих установках повинні виконуватися в строгій відповідності з інструкціями виробника.

d) Робота усередині відсіків з вимикачами головної кільцевої установки може зажадати від'єднання і заземлення усіх видалених кінців головної кільцевої установки

C15. Викопування (для берегових систем).

Перед виконанням будь-якої форми викопування мають бути дотримані наступні процедури:

a) Перевірити всілякі записи і схеми для визначення наявності усіх підземних комунікацій (services), включаючи місця громадського користування

b) Перевірити розриваєму область, використовуючи детектор "кабель/метал"

c) Там, де є такі комунікації, отримати точне їх розташування від їх власника.

d) Якщо є сумніви відносно точного розташування комунікацій, то копка (dug) траншей (slit trenches) має бути виконана вручну в місці розташування комунікацій з особливою обережністю.

C16. Робота на шинах і безпосередньо на підключеному до шин устаткуванні.

Перед початком будь-якої роботи на шинах або секції шин, включаючи будь-яке прямо приєднане устаткування, шини:

a) Мають бути від'єднані від будь-якої точки живлення, включаючи трансформатори напруги; будь який, прямо підключений кабель має бути, від'єднаним на протилежному (remote) кінці.

b) Усі вимикачі на шинах або секціях мають бути висунені в їх від'єднане положення.

c) Усі заходи по ізолюванню повинні бути виконані і штори, що відгороджують високовольтні контакти, контакти які можуть стати під напругою і контакти, де робота не буде робитися, мають бути застопорені і виставлені застережливі таблички.

d) Шина або секція шин має бути перевірена на знеструмленість за допомогою схваленого детектора напруги згідно з правилом C10 (b).

e) Ланцюг головного заземлення має бути підключений до шини як мінімум на одну панель вимикачів секції шин, на якій виконується робота. Додатково ланцюг головного заземлення повинен підключатися до усіх протилежних кінців безпосередньо підключеного устаткування.

f) Додатково ланцюг головного заземлення має бути підключений до будь-яких інших точок для надійного забезпечення того, що шина а будь-який час залишається заземленим до кінця роботи.

g) Має бути виданий окремий по кожній секції шин дозвіл на роботу або санкція на тестування. При цьому не більше за один дозвіл або санкцію повинно бути видано одночасно відносно будь-якої секції шин або будь-якого електроустаткування, приєданого безпосередньо до них;

h) Усі проходи, де проходитиме робота, мають бути перевірені на знеструмленість з використанням схваленого потенційного індикатора напруги.

6.2.4 Документи (Розділ D)

D1. Допуск до роботи.

a) Людина, яка отримує допуск до роботи, повинне розписатися про це в наявному журналі видачі і зберігати його на протязі виконання роботи.

b) Той хто отримав доступ до роботи є відповідальним за його розуміння і забезпечення того, що він повністю знайомий з характером роботи і відповідає за інформованість кожного хто є під його контролем відносно об'єму роботи і джерела небезпеки.

c) Після завершення або припинення роботи, на яку виданий допуск, особа, що отримала його, повинно повернути допуск відповідній особі, уповноваженій на вилучення допусків до роботи після засвідчення того, що усі люди, що працювали з ним, видалені і оголосити, що подальша робота з апаратами є небезпечною або безпечною.

d) Вилучений уповноваженою особою допуск до роботи має бути підшитий безпосередньо інженером-електриком.

e) Допуск до роботи є дійсним тільки для тієї особи, кому він виданий і не повинен передаватися будь кому ні за яких обставин.

f) Зміни і доповнення записів по будь-якому допуску до роботи не повинні робити такий документ недійсним, якщо такі зміни зроблені уповноваженою особою, що видає документ, в спеціальному рядку, позначеною як "receipt", з його підписом.

g) У разі потреби випробування апаратури до закінчення роботи, старшою уповноваженою особою мають бути вжиті наступні заходи:

(i) повідомити і забезпечити людей, що мають відношення до роботи, про те, що подальша робота з апаратурою є небезпечною;

(ii) прикріпити таблички небезпеки до кожного місця, на якому виконувалася робота;

(iii) Вилучити усі видані допуски, що відносяться до цієї роботи.

(h) Якщо з якої-небудь причини, особа, якій був виданий допуск до роботи, стане нездатною продовжувати роботу і якщо робота триває, то мають бути виконані наступні процедури:

(i) має бути виписане новий дозвіл на роботу, який повинно видати особі, яка продовжує цю роботу;

(ii) Старша уповноважена особа повинна вилучити оригінал, допуску і вжити усі необхідні заходи, щоб проінформувати власника оригіналу допуску, включаючи письмове повідомлення на домашню адресу, інформуючи його про те, що його допуск до роботи вилучений і що апаратура вважається під напругою.

D2. Санкція на тестування (Sanction to Test).

Санкція на тестування повинна видаватися аналогічно допуску до роботи. Вона не повинна видаватися до тієї апаратури, по якій допуск до роботи ще в силі або інші санкції на тестування в силі.

D3. Дозвіл обмеженого доступу (limitation of access instruction).

Цей документ видається, якщо повний дозвіл на роботу або санкція на тестування є непідходящими, а усний інструктаж є недостатнім.

Основні етапи при видачі допуску до роботи або санкції до тестування наступні:

1. Відімкнути обладнання, по якому буде виданий допуск до роботи або санкція до тестування.
2. Відімкнути (isolate from) від усіх джерел живлення (включаючи трансформатори напруги). Там де неможливо від'єднати первину обмотку трансформатора, необхідно зняти запобіжники вторинної обмотки та надійно зберегти їх від повторного встановлення.
3. Розрядити на заземлення (де можливо за допомогою автоматичного вимикача або вимикача заземлення). Перевірити знеструмленність обладнання.
4. Приєднатися до головного кола заземлення, і де можливо заблокувати від від'єднання.
5. Положити ключі безпеки до сейфу
6. Перевірити знеструмленність кола, по можливості у робочого місця, на яке видається допуск на роботу або санкція на тестування.
7. Видати допуск на роботу або санкцію на тестування. Якщо не перевірене знеструмленність згідно п.6, то перевірити знеструмленність, коли дроти кола відкрилися та зробилися доступними для вимірювання.

Відповідальним за безпечне виконання вказаних пунктів є Старша уповноважена особа (або в окремих випадках Уповноважена особа)

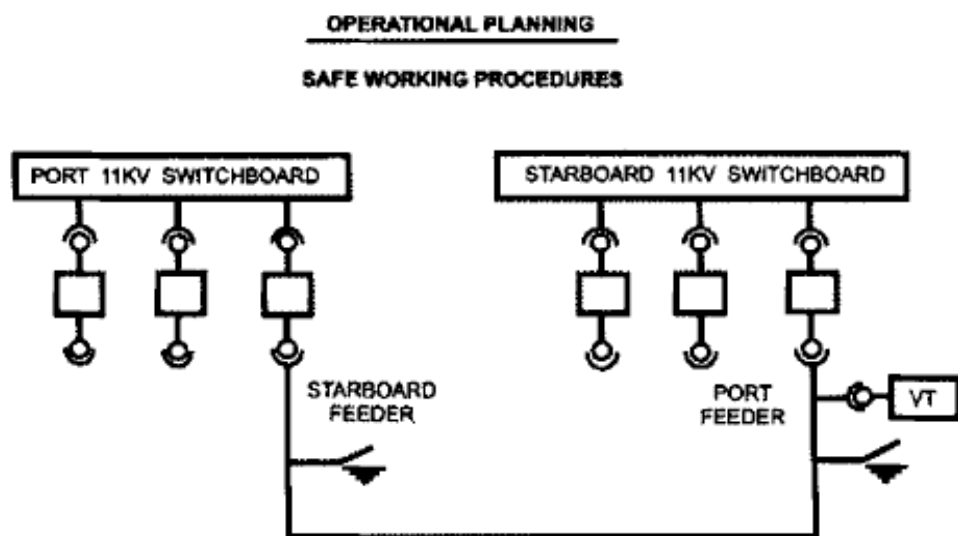


Рис.6.5 Електрична схема для виконання ремонтних робіт

Розглянемо приклад виконання процедури безпечного проведення робіт згідно схеми на рис.6.5. Необхідне підготувати безпечне виконання процедур, щоб можливо було видати допуск на роботу очищення та інспекції виводів кола «STARBOARD FEEDER» правого фідера, лівого розподільного щита PORT11kV Switchboard). Усі автоматичні вимикачі обладнанні вимикачами заземлення, які підключенні у відповідних місцях. Приклад оформлення судової документації наведений в табл.6.3. на мові оригіналу та на укр. мові

Таблиця 6.3 Приклад судової документації для виконання процедури безпечного проведення робіт на мові оригіналу

SERIAL	LOCATION	OPERATION	LOCK
a	b	c	d
1.	Port 11 kV Switchboard	Open (Switch oOFF) STARBOARD FEEDER VCB	–
		Isolate (Withdraw) STARBOARD FEEDER VCB	–
		Secure STARBOARD FEEDER Busbar and shutters (i.e. ‘closed’) with HV Danger Notices	#1
2.	STARBOARD 11 kV Switchboard	Open (Switch oOFF) PORT FEEDER VCB	–
		Isolate (Withdraw) PORT FEEDER VT	–
		Secure PORT FEEDER VT shutters with HV Danger Notice	#5
		Remove PORT FEEDER VT Secondary Fuses (for later storage in Key safe)	–
		Prove PORT FEEDER DIED (i.e. unlock and physically open shutter, test Voltage Detector prove died at orifices with Voltage Detector and re-test Voltage Detector)	#4
		Secure PORT FEEDER shutters with Notices	#4
		‘CLOSE’ PORT FEEDER Earth Switch (i.e. switch to position, applying to port /Starboard 11 kV Feeder cable and Secure with Notice	#6
3.	Port 11 kV Switchboard	Prove STARBOARD FEEDER DIED (i.e. unlock and physically open shutter, test Voltage Detector prove died at orifices with Voltage Detector and re-test Voltage Detector)	#2
		Secure PORT FEEDER shutters with Notices	#2
		‘CLOSE’ PORT FEEDER Switch (i.e. switch to position, applying to port /Starboard 11 kV Feeder cable and Secure with Notice	#7
4.	Control Room – Key Safe No.66	Deposit Keys #1, #3, #4, #5, #6 and #7 in Key Safe (together with PORT FEEDER VT Secondary Fuses)	–
		Retain Key #2 and lock Key Safe, Removing and also retaining Keys 66A & 66B	#2, 66A & 66B
5.	Port 11 kV Switchboard	Prove the Point of Work (STARBOARD FEEDER orifices) DEAD (i.e. unlock and physically open shutter, test Voltage Detector prove died at orifices with Voltage Detector and re-test Voltage Detector)	#2
		Secure PORT FEEDER shutters with Notices	#2
		Issue High Voltage Permit – to – Work and Key 66B and Key #2 to Competent Person who (after signing etc Receipt section on PTW) may then commence the work specified in section 1(c) of the document	#2 & 66B

Приклад суднової документації для виконання процедури безпечного проведення робіт на укр. мові

Номер	Місце-знаходження	Операція	Блокування
a	b	c	d
1.	Port 11 kV Switchboard	Відкрити (Відключити) STARBOARD FEEDER VCB	—
		Ізолювати (зняти) STARBOARD FEEDER VCB	—
		Заблокувати STARBOARD FEEDER шину та шторки (тобто закрити) з биркою високовольтної небезпеки	#1
2.	STARBOARD 11 kV Switchboard	Відкрити (Відімкнути) PORT FEEDER VCB	—
		Ізолювати (зняти) PORT FEEDER VT	—
		Заблокувати шторки PORT FEEDER VT з биркою високовольтної небезпеки	#5
		Зняти вторинні запобіжники PORT FEEDER VT (для послідуячого зберігання у сейфі для ключів)	—
		Підтвердити, що PORT FEEDER відключений від джерела енергії (тобто розблокувати та фізично відкрити шторку, протестувати детектором напруги знеструмленність, повторно пере перевірити знеструмленність)	#4
		Заблокувати шторки PORT FEEDER биркою	#4
		Закрити PORT FEEDER Earth вимикач (тобто перемкнути у позицію, яка відповідає Starboard 11 kV Feeder cable) і заблокувати з биркою	#6
3.	Port 11 kV Switchboard	Підтвердити, що STARBOARD FEEDER відключений від джерела енергії (тобто розблокувати та фізично відкрити шторку, протестувати детектором напруги знеструмленність, повторно перевірити знеструмленність)	#2
		Заблокувати шторки PORT FEEDER биркою	#2
		Закрити PORT FEEDER вимикач (тобто перемкнути у позицію, яка відповідає Starboard 11 kV Feeder cable) і заблокувати з биркою.	#7
4.	Control Room – Key Safe No.66	Помістити ключі #1, #3, #4, #5, #6 and #7 в сейф для ключем (сумісно з PORT FEEDER вторинними запобіжниками)	—
		Зберегти ключ #2, видалити та також зберегти ключі 66A та 66B	#2, 66A & 66B
5.	Port 11 kV Switchboard	Підтвердити, що місце роботи (STARBOARD FEEDER пройм) відключений (тобто. Розблокувати та фізично відкрити шторки, перевірити детектором напруги знеструмленність, повторно перевірити знеструмленність)	#2
		Заблокувати шторки PORT FEEDER биркою	#2
		Видати високовольтний допуск до роботи та ключі 66B и #2 Компетентній особі, яке (після підписання розділу 1(с) на допуску до роботи) може почати	#2 & 66B

		роботу, яка вказана в секції 1(с) документа	
--	--	---	--

В таблиці 6.4 наведена типова форма листа високовольтного допуску (HIGH VOLTAGE ELECTRICAL PERMIT FOR WORK) на мові оригіналу.

Таблиця 6.4 Типова форма листа високовольтного допуску на мові оригіналу

Maintenance work on any item of electrical equipment or electrically powered system		Ref No: XX/YYYY	
Work Location :		Permit Validity (Max. 12 hours) : From (Date) : _____ To _____ From (Time) : _____ To _____	
Reason for electrical work :		1. If there is any change in conditions or in the electrical work itself, stop electrical work & issue a new Permit. 2. Issue a new Permit if electrical work is stopped for more than six hours.	
PPE Required for this job :			
Person In Charge (Print & Sign):	Personnel detailed to carry out the electrical work :		
ELECTRICAL WORK PRECAUTIONS			
1. A Tool Box Talk and Risk assessment must be carried out and insert reference no. Tool box ref no:		RA ref no:	
2. Does the electrical work to be done have other safety implications? (example : need to go up mast)		Y	N
3. Has the Master and/or the Chief Engineer and other relevant personnel been informed?		Y	N
4. Have Bridge & Engine room Watch keepers been notified?		Y	N
5. Will the shutting down of the electrical equipment affect other equipment/operations/activities?		Y	N
6. Has the electrical equipment/system to be worked on been electrically isolated?		Y	N
7. Is it ensured that the electrical equipment/system cannot possibly be switched on accidentally?		Y	N
8. Is the electrical equipment/system to be worked on locked out / tagged out? LOTO ref no:		Y	N
9. Is the electrical equipment/system electrically de-energised, including batteries/capacitors etc.?		Y	N
10. Has other related equipment been depressurised (example: Electric Compressors, Pumps, etc.)?		Y	N
11. If appropriate, has the working location been barricaded?		Y	N

12. Are Emergency Procedures clearly understood by all personnel involved?			Y		N		NA	
13. Is Emergency Equipment available if appropriate?			Y		N		NA	
14. Is all equipment to be used approved type, inspected & tested & found to be in good condition?			Y		N		NA	
15. If the worksite is to be left unattended, is there a warning sign available?			Y		N		NA	
16. Is the working area clear of obstructions with safe access?			Y		N		NA	
17. Is head office approval required for this work to be carried out? If (✓) Y, attach approval.			Y		N		NA	
18. Is the person in charge in attendance?			Y		N		NA	
If any of the above have been checked (✓) N, explain why :								
PERSON RESPONSIBLE FOR SAFETY			MASTER/Chief engineer					
Name	Sign	Date	Name	Sign	Date			
JOB COMPLETION								
The work is completed, all persons, materials & equipment removed & worksite returned to normal Any equipment that has been isolated (particularly fire fighting / fire detection equipment) must be immediately reinstated on job completion								
Name	Sign	Date	Name	Sign	Date			

Типова форма листа високовольтного допуску на укр. мові.

Профілактичні (ремонтні) роботи будь якого типу електричного обладнання або електричних енергетичних систем.		RefNo: XX/YYYY
Місцеположення роботи:	Допуск дійсний (Макс. до 12 годин) Від (дата) : _____ до _____ Від (час) : _____ до _____	
Підстави для проведення електричної роботи:	1. Якщо виникли будь які зміни в умовах проведення або обсягу електричної роботи необхідно зупинити виконання електричної роботи і зареєструвати новий допуск 2. Зареєструвати новий допуск якщо електричні роботи були зупиненні більш ніж на 6 годин. .	
Засоби індивідуального захисту, які необхідні при проведенні роботи:		
Компетентна особа (Печатними літерами і підпис):	Посадові особи, які персонально виконують дану роботу (ПІБ, посада):	

Обережності при проведенні електричної роботи							
1. Необхідний інструктаж по техніки безпеки та оцінка ризику повинні бути проведені і вказаний номер Інструкції: RA ref no					RA ref no:		
2. Є необхідність виконати ще щось після завершення цієї роботи, що може вплинути на безпеку? (наприклад: необхідно піднятися на щоглу.)?					Y	N	NA
3. Поставлені чи до відома Капітан і/або Старший механік та інші уповноважені особи?					Y	N	NA
4. Поставлені чи до відома відповідальні (вахтові) на мостику та машинному відділенні?					Y	N	NA
5. Вплине чи відключення цього електричного обладнання на інше обладнання / операції / роботу?					Y	N	NA
6. Необхідно чи електричне ізолювати обладнання де будуть проводитися роботи?					Y	N	NA
7. Є чи можливість включення електричного обладнання/системи випадковим чином?					Y	N	NA
8. Переконайтеся що обладнання /система на якому будуть проводитися роботи вимкнено і не може бути включено доки роботи на закінчаться LOTO ref no:					Y	N	NA
9. Електричне обладнання/система знеструмленні, включаючи батареї/конденсатори та інше?					Y	N	NA
10. Знято чи тиск з іншого пов'язаного обладнання (наприклад, електричні компресори, насоси та ін.)?					Y	N	NA
11. Є необхідність в загородженні робочого місця де будуть проводитися роботи?					Y	N	NA
12. Всім задіяним в роботі учасникам роз'яснено та зрозуміло що робити в аварійної ситуації?					Y	N	NA
13. У випадку необхідності, буде чи доступно аварійне обладнання?					Y	N	NA
14. Усе необхідне для роботи обладнання сертифікованого типу, проінспектовано, і тестовано, і в робочому стані?					Y	N	NA
15. Якщо місце робіт буде залишено без нагляду, є чи попереджувальний знак про доступність?					Y	N	NA
16. Робоча зона очищена від перешкод і забезпечений безпечний доступ?					Y	N	NA
17. Необхідне чи дозвіл головного офісу для проведення цих робіт? Якщо так, то надайте відповідний дозвіл.					Y	N	NA
18. Присутнє чи компетентна особа?					Y	N	NA
Якщо якийсь пункт позначено знаком N (ні), то поясніть чому:							
Уповноважена особа, яка відповідає за безпеку				Капітан/Старший механік			
ПІБ	підпис	дата	ПІБ	підпис	дата		
ПО ЗАВЕРШЕННІ РОБОТИ							

Робота закінчена, всі учасники, матеріали/робочі інструменти убрані і робоче місце приведено в робочий стан. Усе обладнання, яке було відключено (ізольоване) (особливо засоби пожежогасіння/пожарні датчики) повинні бути негайно підключені після закінчення робіт.

ПІБ	підпис	дата	ПІБ	підпис	дата
-----	--------	------	-----	--------	------

Деякі терміни та скорочення:

High Voltage Electrical Permit For Work (PFW) - високовольтний допуск до роботи

VCB – вакуумний вимикач

Live – обладнання під напругою

Died – обладнання немає електричної чи будь якої енергії (знеструмлене)

Tool box Talk – інструкція по техніки безпеки

Y – так

N – ні

NA – не відноситься до даного випадку

Work on High Voltage Busbars – робота на високовольтних шинах

Work on High Voltage Cables – робота на високовольтному кабелі

Work on High Voltage Transformers – робота на високовольтному трансформаторі

Work on High Voltage AC Motors – робота на високовольтному двигуні змінного струму

Work on Withdrawable/Removable High Voltage Apparatus – робота на знімною високовольтною апаратурою

Earthing – заземлення

Switchgear – комутаційне обладнання

6.2.5 Рівні повноважень (Розділ E)

A. Видача і вилучення допусків до роботи.

B. Видача і вилучення санкцій на тестування.

C. Видача і вилучення дозволів обмеженого доступу.

D. Отримання санкцій на тестування.

E. Підключення і зняття заземлень головного контуру.

F. Застосування схвалених високовольтних потенційних індикаторів.

G. Виконання високовольтних перемикань.

H. Вхід в щитові і трансформаторні приміщення.

I. Який встановлений інженером-електриком.

ПРИМІТКА: Старша уповноважена особа має градацію від A до H включно.

6.2.6 Керівництво по безпеці (Додаток 1)

Увесь персонал повинен відповідати вимогам Правил по високовольтній безпеці і іншим встановленим Правилам. Ці Правила базуються на глибокому досвіді і заняттям по нижченаведених основах заходів безпеки, які дозволяють уникнути небезпек, каліцтв і ушкоджень.

Якщо Ви є особою, що видає допуск, то на вашій відповідальності лежить забезпечення, безпечного робочого місця так, щоб:

1. Апаратура була від'єднана і заземлена, замкнута і промаркірована.
2. Були виставлені бар'єри для запобігання доступу в небезпечну зону.
3. Був виписаний спеціальний допуск без двозначностей.
4. Ви перевірили знеструмленість (відсутність напруги) на робочому місці,

Якщо Ви є Одержувачем допуску, то Ви є відповідальними за роботу й безпеку усього персоналу у Вашій робочій групі і тому:

1. Ви переконуєтеся або перевіряєте відключення і заземлення.
2. Ви перевіряєте, щоб бирки на апаратурі співпадали з вказаними в допуску.
3. Ви читаєте допуск Вашій робочій групі і вказуєте їм межі роботи.
4. Ви бачите, що особа, що видала допуск, перевірила знеструмленість провідників, з якими Вам належить працювати.

Зауваження: Коли Ви ставите підпис на допуску, то це означає, що Ви погодилися з тим, що апаратура є безпечною для роботи. Тому не ставте підпис до тих пір, поки Ви не переконаєтеся, що Ваше робоче місце є безпечним.

6.2.7 Поводження з потерпілим при електричному шоку (Додаток 2)

Методи штучного дихання повинні викладатися кваліфікованим інструктором і проводитися регулярно.

Необхідні негайні і швидкі дії:

1. Звільнення від контакту з електрикою.

Відключити струм негайно або необхідне послати когось зробити це. Не намагатися відтягати потерпілого від контакту з високою напругою без зручних для цієї мети, ізольованих від напруги мережі, предметів. Для звільнення потерпілого від контакту з низькою напругою використовувати гумові рукавички, калоші, мати або ізольовану тростину, але якщо цього не має, то використовувати мотузок або частини одягу, щоб звільнити потерпілого. Незалежно від виду предмет має бути сухим і таким, що не проводить струм.

2. Після звільнення.

Не втрачати марно час на його пересування. Укласти пацієнта на що-небудь, по можливості, сухе й перевірити, що можливо немає дихання, тоді негайно приступити до штучного дихання і послати кого-небудь по медичну допомогу і карету швидкої допомоги. Не припиняти зусиль із відновлення дихання до тих пір, поки не скаже про це лікар. Найбільш ефективним і переважним є метод "рот в рот".

Спосіб штучного дихання полягає в тому, що тій що надає допомогу робить видих зі своїх легенів в легені потерпілого безпосередньо в рот. Потерпілого укладають на спину, розкривають рот, видаляють з рота сторонні предмети, закидають голову потерпілого назад, поклавши під потилицю одну руку, а другою рукою натиснути на лоб потерпілого, щоб підборіддя виявилось на одній лінії з шиєю. Вставши на коліна треба з силою вдихнути повітря в рот потерпілого через марлю або носову хустку, закривши йому ніс. Вдих тривати 5-

6 сек., або 10-12 раз на хвилину. Грудна клітка потерпілого повинна розширюватися, а після звільнення рота і носа самостійно опускатися. При відновленні самостійного дихання деякий час слід продовжувати штучне дихання до повної свідомості потерпілого. Необхідно уникати надмірного здавлювання грудної клітки із-за можливості перелому ребер. Одночасно треба проводити зовнішній масаж серця за відсутності пульсу.

Зовнішній (непрямий) масаж серця робиться шляхом ритмічного стискання серця через передню стінку грудної клітки при натисканні на нижню частину грудини. Повторюючи натискання частотою 60-70 раз на хвилину. Той що надає допомогу, визначивши нижню третину грудини, повинен покласти на неї верхній край долоні, згори покласти другу руку і натискати на грудну клітку потерпілого, злегка допомагаючи нахилом свого корпусу. Натискання слід робити швидким поштовхом так, щоб просунути на 3-4 см нижню частину грудини у бік хребта, а у повних людей - на 5-6 см. Через кожні 5-6 натискань - одне вдування. Якщо надає допомогу одна людина, слід чергувати після 2 глибоких вдувань - 10-12 натискань для масажу серця. При правильному проведенні штучного дихання і масажу серця у потерпілого з'являються наступні ознаки поживлення :- поліпшення кольору обличчя - поява самостійного дихання усе більш рівномірного - звуження зіниць - поява самостійного пульсу.

Контрольні питання до розділу 6

1. Вплив електричного струму на організм людини
2. Основні заходи при поразки людини електричним струмом.
3. Електробезпека при виникненні дуги і ударного навантаження
4. Електрозахисті засоби
5. Принципи і ефективність заземлення з точки зору електробезпеки.
6. Допустимі значення опору заземлення
7. Забезпечення безпеки при роботі з високовольтною апаратурою
8. Допуск персоналу до обслуговування та ремонту високовольтного електрообладнання.
9. Рівні повноважень персоналу при обслуговуванні та ремонту високовольтного електрообладнання.
10. Поводження з потерпілим при електричному шоку

Перелік літератури

1. Будашко В.В. Високовольтні технології в морській електроінженерії: монографія / В.В.Будашко, О.М.Піпченко, В.В.Пономаренко, В.А.Шевченко. – Одеса: НУ «ОМА», 2020. – 398 с.
2. Рой В.Ф. Техніка високих напруг: конспект лекцій. – Харків: ХНУМГ, 2016. – 160 с.
3. Акімов О.І., Сушко Д.Л. Техніка високих напруг. Ізоляція та перенапруги в пристроях електропостачання: Навч. посібник. – Харків:УкрДАЗТ, 2009. – 217 с.
4. Бржезицький В.О., Ісакова А.В., Руликов В.В. та ін. Техніка і електрофізика високих напруг: Навч. посібник /За ред. В.О.Бржезицького та В.М. Михайлова. – Харків: НТУ «ХП» - Торнадо, 2005. – 930 с.
5. Василець С.В., Василець К.С. Техніка високих напруг: навчальний посібник – Рівне: НУВГТІ, 2018. – 187 с.
6. Кутін В.М., Рубаненко О.Є., Мисенко С.В. Методи та засоби діагностування елегазових вимикачів: Монографія. – Вінниця: ВНТУ, 2018 – 124 с.
7. Маврін О.І., Покровський К.Б., Дудурич О.Б. Високовольтна ізоляція у задачах і контрольних питаннях: Навч. посібник. – Львів: Львівська політехніка, 2013 – 188 с.
8. Пипченко А. Н. Судовое высоковольтное оборудование /А. Н. Пипченко, В. В. Пономаренко, В.А. Шевченко.- Одесса: ТЭС, 2017. – 300 с.
9. Важов В. Ф., Лавринович В. А. Техника высоких напряжений / Учебник для бакалавров направления 140200 "Электроэнергетика" — ТПУ, 2014. — 263 с
10. А. В. Григорьев, А. Ю. Васильев, С. М. Малышев Анализ возможностей применения высоковольтных электростанций для судов с системами электродвижения. Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О.Макарова, Выпуск 5 2016, с.159-165
11. Набатов, К.А. Высоковольтные вакуумные выключатели распределительных устройств : учебное пособие / К.А. Набатов, В.В. Афонин. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 96 с.
12. Соколов С.Е., Соколова И.С. Элегазовые выключатели. Учебное пособие.: - Алматы: АУЭС, 2016. - 84 с.
13. Безопасная эксплуатация судового высоковольтного электрооборудования: Учеб. пособие: кн.2./ А.Н.Пипченко, В.В.Пономаренко, А.Е.Савельев, В.А.Шевченко; Ин-т последиплом. образования «Одесский морской тренажерный центр». - Одеса; ТЭС, 2008. - 260 стр.
14. Г. Е. Куртенов Изоляция высоковольтного оборудования / Учебное пособие.— Томск: Издательство ТПУ, 2015. —87 с
15. Красько, А.С. Техника высоких напряжений (изоляция и перенапряжения): курс лекций: в 2 ч. / А.С. Красько, Е.Г. Пономаренко. – Минск: БНТУ, 2011. –Ч. 1: Электрические разряды в газах. Внешняя изоляция воздушных линий и распределительных устройств. Внутренняя изоляция. – 119 с.

16. Халилов Ф.Х. Классификация перенапряжений. Внутренние перенапряжения. Учебное пособие. Издание НОУ “Центр подготовки кадров энергетики”, Санкт-Петербург, 2012. – 80 с.
17. Вдовиченко В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования / В.П. Вдовиченко. – Новосибирск: Наука, 2007. – 155 с.
18. Хренников А.Ю. Высоковольтное оборудование в электротехнических системах: диагностика, дефекты, повреждаемость, мониторинг: учеб. пособие /А.Ю. Хренников. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 186с.
19. Техника высоких напряжений: учебное пособие/ В.А. Бутенко, В.Ф. Важов, Ю.И. Кузнецов, Г.Е. Куртенков, В.А. Лавринович, А.В. Мытников, М.Т. Пичугина, Е.В. Старцева – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 119 с.
20. Закарюкин В.П. Техника высоких напряжений: Конспект лекций. – Иркутск: ИрГУПС, 2005. – 137 с
21. Набатов, К.А. Высоковольтные вакуумные выключатели распределительных устройств : учебное пособие / К.А. Набатов, В.В. Афонин. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 96 с
22. Соколов С.Е., Соколова И.С. Элегазовые выключатели. Учебное пособие.: - Алматы: АУЭС, 2016. - 84 с.
23. Белявин К.Е. Электробезопасность при эксплуатации электроустановок: справочное пособие/К.Е.Белявин, Б.В.Кузнецов. – Минск: Бедорус. Наука, 2007. -195 с
24. Высоковольтные вакуумные выключатели — устройство и принцип работы. /<https://amperof.ru/elektropribory/vakuumnye-avtomaticheskie-vyklyuchateli.html>
25. Выкатные воздушные автоматические выключатели TemPower2 / http://www.svaltera.ua/upload/manuals/Terasaki/TemPower2_rus.pdf
26. Элегазовые выключатели серии LF 6 / <http://www.schneider-electric.ru>
27. Масляные выключатели ВМГ, МГ, ВМП, ВМК, МКП / <http://electricalschool.info/main/visokovoltny/1972-masljanye-vykljuchateli-mv.html>
28. КРУ. Ячейки SMU-35/ Каталог /www.ues.su
29. Тренажер судового высоковольтного оборудования "High Voltage Breaker" / <https://www.100rmsim.ru/product/138/2140.html>
30. Н.И. Муха, А.О. Дранкова, В.Н. Волошин, А.Р. Миська, С.А Дудко Тренажер судовой автоматизированной электроэнергетической системы./ Авиационно-космическая техника и технология, 2011, №9, с.207-211
31. Н.И. Муха Полномасштабный тренажерный комплекс для судовых электромехаников и механиков. / <https://docplayer.ru/36803904-Muha-n-i-odesskaya-nacionalnaya-morskaya-akademiya-polnomasshtabnyy-trenazhernyy-kompleks-dlya-sudovyh-elektromehanikov-i-mehanikov.html>