

Вінницький національний технічний університет

Факультет електроенергетики та електромеханіки

Кафедра електричних станцій і систем

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

**ОСОБЛИВОСТІ ЗАХИСТУ ВІД АТМОСФЕРНИХ ТА ВНУТРІШНІХ
ПЕРЕНАПРУГ У МЕРЕЖАХ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ**

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕСМ-23мс
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
за ОП «Електричні системи та мережі»,
Бойко М. М.

Керівник: к.т.н., доц., доцент каф. ЕСС
Лесько В.О.

« 06 » 06 2025 р.

Рецензент: *М.В. Родик* *каф. ЕССЕМ*
(наук.ступінь, вч.звання, назва кафедри)

« 06 » 06 2025 р.

Допущено до захисту
завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В. О.

« 06 » 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
 Факультет електроенергетики та електромеханіки
 Кафедра електричних станцій та систем
 Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
 Галузь знань – 14 «Електрична інженерія»
 Спеціальність – 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
 Освітня програма – Електричні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕСС
 д.т.н., професор Комар В. О.

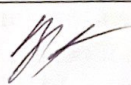
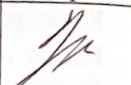
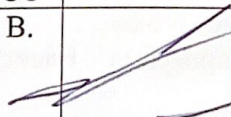
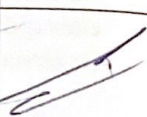
«10» 03 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Бойку Миколі Миколайовичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Особливості захисту від атмосферних та внутрішніх перенапруг у мережах середньої напруги»
 Керівник роботи к.т.н., доцент каф. ЕСС Лесько В. О.
 затверджена наказом вищого навчального закладу від 20.03.2025 року № 97
2. Термін подання студентом роботи 4 червня 2025 року
3. Вихідні дані до роботи: Перелік літературних джерел за тематикою роботи:
1. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х. : Видавництво «Форт», 2017. – 760 с. 2. «ПТЕ Технічна експлуатація електричних станцій та мереж.» 3. Електричні системи і мережі. Частина 1: навчальний посібник / Ю. В. Малогулко, О. Б. Бурикін, Т. Л. Кацадзе, В. В. Нетребський. Вінниця : ВНТУ, 2020. 203 с. 4. Кулик В. В. Типові рішення при проектуванні електричних мереж напругою 110-330 кВ: навчальний посібник / В. В. Кулик, В. В. Тептя, О. Б. Бурикін, О. В. Сікорська. Вінниця: ВНТУ, 2018. 110 с.
4. Зміст текстової частини: Вступ. 1. Умови виникнення перенапруг. 2. Умови виникнення перенапруг. 3. Особливості конструкції електрообладнання для обмеження перенапруг. 4. Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1. Види перенапруг 2. ОПН. 3. Розрядники

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Спеціальна частина	Керівник роботи Лесько В. О., к.т.н., доц., доцент кафедри ЕСС		
Охорона праці	Кобилянський О. В. д.п.н., проф., завідувач каф. БЖДПБ		

7. Дата видачі завдання 20 березня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапів	Термін виконання етапів роботи		Примітка
		початок	кінець	
1	Формування та затвердження задач БКР	21.03.2025	24.03.2025	
2	Вступ. Огляд літературних джерел	25.03.2025	30.03.2025	
3	Умови виникнення перенапруг (розділ 1 БКР)	31.03.2025	07.04.2025	
4	Особливості конструкції електрообладнання для обмеження перенапруг (розділ 2 БКР)	08.04.2025	11.04.2025	
5	Умови виникнення перенапруг (розділ 3 БКР)	12.04.2025	19.04.2025	
6	Виконання розділу охорона праці (розділ 4 БКР)	20.04.2025	30.04.2025	
7	Формування висновків по роботі	01.05.2025	03.05.2025	
8	Оформлення пояснювальної записки	04.05.2025	19.05.2025	
9	Виконання графічної частини та оформлення презентації	20.05.2025	27.05.2025	
10	Перевірка БКР на плагіат. Попередній захист БКР.	28.05.2025	3.06.2025	
11	Рецензування БКР	04.06.2025	09.06.2025	
12	Захист БКР	10.06.2025	12.06.2025	

Студент

(підпис)

М.М. Бойко

Керівник роботи

(підпис)

В. О. Лесько

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 УМОВИ ВИНИКНЕННЯ ПЕРЕНАПРУГ	8
1.1 Умови виникнення перенапруг в мережах	8
1.2 Аналіз умов виникнення атмосферних перенапруг.....	12
1.3 Аналіз умов виникнення внутрішніх перенапруг.....	20
1.4 Сучасний стан захисту від перенапруг в мережах 6-10 кВ.....	22
2 ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОБМЕЖЕННЯ ПЕРЕНАПРУГ.....	25
2.1. Класифікація розрядників і вимоги до них.....	25
2.2. Трубочасті розрядники.....	26
2.3. Вентильні розрядники.....	28
2.4. Обмежувачі перенапруг.....	44
3 УМОВИ ВИБІРУ РОЗРЯДНИКІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ.....	51
3.1 Розрахунок струмів короткого замикання.....	51
3.2 Розрахунок періодичної складової струму КЗ для часу $t = 0,57$	54
3.3 Розрахунок ударного струму КЗ, аперіодичної та періодичної складової струму КЗ в момент часу $t = \tau$	56
3.4 Розрахунок термічної дії струмів КЗ.....	60
3.5 Вибір розрядників.....	62
4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	67
ВИСНОВКИ.....	78
ЛІТЕРАТУРА.....	77
ДОДАТКИ	

Анотація

Бойко М. А. «Особливості захисту від атмосферних та внутрішніх перенапруг у мережах середньої напруги». Бакалаврська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – 83 с. Рис. 10, табл.18, бібліогр. 26.

Проблема підвищення надійності роботи розподільних мереж напругою 6-10 кВ складається з цілого комплексу завдань, ефективне вирішення яких може бути знайдене для кожної конкретної мережі індивідуально. З урахуванням характерних її особливостей на основі комбінованого використання засобів релейного захисту, вдосконалення режиму заземлення нейтралі, застосування обмежувачів перенапруги серії ОПН з різними порогами обмеження, застосування вентильних та трубчастих розрядників для захисту мереж від атмосферних та внутрішніх перенапруг, та використання системи швидкого і автоматичного шунтування пошкодженої фази.

Ключові слова: електричні мережі середньої напруги; атмосферні перенапруги; внутрішні перенапруги; розрядники; обмежувачі перенапруг; грозозахист; трубчастий розрядник; вентильний розрядник; ОПН; дуговий пробій; релейний захист; заземлення нейтралі; електробезпека; аварійний режим; надійність електропостачання.

Annotation

Problem of increase of reliability of working as of distributive networks tension 6-10 kv consists of whole complex of tasks the effective decision of which can be found for every concrete network individually. Taking into account its characteristic features on the basis of the combined use of facilities of relay defence, perfection of the mode of neutral ground, applications of terminators of overstrain of series ARF with the different thresholds of limitation, by application of valve and tubular spark-gaps for protecting of networks from atmospheric and internal overstrains, and use of the system of the rapid and automatic by-passing of the damaged phase.

Keywords: medium voltage electrical networks; lightning overvoltages; internal overvoltages; surge arresters; overvoltage limiters; lightning protection; expulsion arrester; valve-type arrester; metal-oxide surge arrester (MOA); arc fault; relay protection; neutral grounding; electrical safety; fault conditions; power supply reliability.

ВСТУП

Надійне та безперебійне електропостачання споживачів є однією з головних умов стабільного функціонування будь-якої інфраструктури. У структурі енергосистем важливу роль відіграють мережі середньої напруги (6–35 кВ), які забезпечують розподіл електроенергії між підстанціями, промисловими підприємствами та кінцевими споживачами. Однак ці мережі часто зазнають впливу перенапруг — небезпечних електромагнітних явищ, які здатні вивести з ладу електротехнічне обладнання, знизити рівень електробезпеки та спричинити порушення в роботі мережі.

Перенапруги бувають атмосферного та внутрішнього походження. Атмосферні перенапруги виникають внаслідок прямих або непрямих ударів блискавки, особливо в регіонах із підвищеною грозовою активністю. Вони часто стають причиною аварій на повітряних лініях, особливо з недостатньо ефективним грозозахистом. Внутрішні перенапруги обумовлені процесами в самій енергосистемі — переключенням навантажень, комутацією, аваріями, резонансними явищами, дуговими замиканнями на землю. Ці перенапруги можуть бути короткочасними, але значно перевищувати номінальний рівень напруги.

Захист електричних мереж від перенапруг є надзвичайно актуальним завданням, оскільки дозволяє запобігти пошкодженню обладнання, продовжити термін його служби, зменшити витрати на ремонт і технічне обслуговування. Одним із найефективніших способів обмеження перенапруг є використання розрядників — спеціальних пристроїв, які миттєво реагують на перенапругу і відводять надлишкову енергію в землю. Найпоширенішими типами таких пристроїв є трубчасті розрядники (РТ), вентильні розрядники (ВТ) та обмежувачі перенапруг нелінійні (ОПН), кожен з яких має свої особливості конструкції, принципу дії та області застосування.

Також важливим напрямом є вдосконалення системи заземлення, релейного захисту, використання швидкодіючих пристроїв автоматичного

шунтування пошкодженої фази, що дозволяє мінімізувати наслідки перенапруг і скоротити час їх дії. Комплексний підхід до вибору захисту від перенапруг із урахуванням особливостей конкретної мережі дозволяє підвищити загальну надійність і ефективність роботи енергетичної системи.

Актуальність теми даної бакалаврської кваліфікаційної роботи зумовлена потребою в удосконаленні методів і засобів захисту від перенапруг, що особливо важливо для розподільних мереж середньої напруги, які зазнають найбільшого навантаження в умовах зростання кількості електроспоживачів, впровадження відновлюваних джерел енергії та цифровізації енергетичних процесів.

Мета роботи полягає в дослідженні особливостей виникнення атмосферних та внутрішніх перенапруг у мережах середньої напруги, аналізі методів їх обмеження та виборі оптимальних технічних рішень для ефективного захисту електрообладнання.

Завдання роботи:

провести огляд природи та класифікації перенапруг у електричних мережах;

дослідити конструктивні особливості та принцип дії основних типів розрядників;

здійснити порівняльний аналіз ефективності засобів захисту від перенапруг;

розглянути приклад застосування захисних пристроїв у конкретній мережі;

сформулювати рекомендації щодо вибору оптимального типу захисту з урахуванням особливостей мережі.

Об'єкт дослідження – розподільні електричні мережі середньої напруги (6–10 кВ).

Предмет дослідження – засоби та методи захисту електрообладнання від атмосферних та внутрішніх перенапруг.

Результати цієї роботи можуть бути використані при модернізації існуючих мереж, у навчальному процесі та при розробці проєктів нових електричних систем.

1 ПЕРЕНАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ

1.1 Умови виникнення перенапруг в мережах

Під час експлуатації на ізоляцію ліній і електрообладнання мереж 6-10 кВ впливає довготривала робоча напруга, та короткочасні перенапруги. Для них найбільшу небезпеку становлять грозові. Проте, наприклад в кабельних мережах, куди доступ грозових перенапруг дещо ускладнений, для вибору ізоляції важливе значення мають внутрішні перенапруги. З чого можна зробити висновок, про те що в розподільчих мережах 6-10 кВ має місце значна аварійність через дію на ізоляцію вищевказаних перенапруг. Для аналізу причин відносно високої аварійності в цих мережах наведемо мінімальні допустимі кратності перенапруг на ізоляції. З цією метою в (табл. 1.1-1.3) наведені допустимі кратності грозових та внутрішніх перенапруг по відношенню до мінімальної та максимальної фазної напруги мережі. При цьому припустимо, що на ізоляції можна допустити грозові перенапруги з амплітудою не більшою випробувальної напруги повною хвилею і внутрішніх перенапруг, амплітуда яких розраховується за формулою:

$$U_{\hat{a}i} = \delta_{\hat{a}i} \cdot \hat{E}_{\hat{a}i} \cdot \sqrt{2} V_{\hat{a}i}$$

де $\delta_{\hat{a}i} = 1,3$ – коефіцієнт імпульсу при внутрішніх перенапругах;

$\hat{E}_{\hat{a}i} = 0,9$ – коефіцієнт кумулятивності;

$U_{\hat{a}i}$ - випробувальна однохвилинна напруга внутрішньої ізоляції.

Таблиця 1.1 – Допустимі кратності внутрішніх перенапруг для електрообладнання 6-10 кВ з нормальною ізоляцією

Номінальна напруга U_i , кВ	6	10
Найбільша робоча напруга, діюче значення, кВ.	7.2	12
Мінімальна випробувальна напруга грозовими імпульсами електрообладнання з нормальною ізоляцією, кВ, максимальне значення.	60	80
Мінімальна кратність грозових перенапруг по відношенню до найбільшої фазної робочої напруги.	10.3	8.2
Мінімальна кратність грозових перенапруг по відношенню до номінальної фазної напруги мережі.	12.3	9.8

Таблиця 1.2 – Допустимі кратності внутрішніх перенапруг для електрообладнання 6-10 кВ з нормальною ізоляцією

Номінальна напруга U_i , кВ	6	10
Найбільша робоча напруга, діюче значення, кВ.	7.2	12
Мінімальна однохвилинна випробувальна напруга частотою 50 Гц, кВ, діюче значення.	25	35
Допустима напруга на ізоляції при внутрішніх перенапругах, кВ, максимальне значення.	41,2	57,6
Мінімальна кратність внутрішніх перенапруг по відношенню до найбільшої фазної робочої напруги.	7,1	5,9
Мінімальна кратність внутрішніх перенапруг по відношенню до номінальної фазної робочої напруги	8,4	7,0

Таблиця 1.3 – Допустимі кратності внутрішніх перенапруг для електрообладнання 6-10 кВ з полегшеною ізоляцією

Номінальна напруга U_i , кВ	6	10
Найбільша робоча напруга, діюче значення, кВ.	7.2	12
Мінімальна однохвилинна випробувальна напруга частотою 50 Гц, кВ, діюче значення.	16	24
Допустима напруга на ізоляції при внутрішніх перенапругах, кВ.	26,4	39,6
Мінімальна кратність внутрішніх перенапруг по відношенню до найбільшої фазної робочої напруги.	4,5	4,0
Мінімальна кратність внутрішніх перенапруг по відношенню до номінальної фазної робочої напруги	5,4	4,8

Як видно з таблиць, запаси ізоляції 6-10 кВ по грозових перенапругах достатньо високі, і становлять приблизно 8,0. По внутрішнім перенапругах вони становлять не менше 4,0 для електрообладнання з полегшеною ізоляцією, та не менше 6,0 для електрообладнання з нормальною ізоляцією.

Захист від перенапруг в мережах 6-10 кВ має свої особливості. В першу чергу – це режим заземлення нейтралі. В розподільчих мережах 6-10 кВ при пошкодженні ізоляції однієї з фаз вона продовжить працювати до тих пір, поки не буде знайдене місце і ліквідована причина пошкодження.

Інша особливість полягає в тому, що на ряду з "локальними" перенапругами, що виникають при комутаціях ліній, електричних машин, трансформаторів і при ферорезонансних явищах, мають місце дугові перенапруги, що охоплюють практично всю мережу.

Ще однією особливістю мереж 6-10 кВ є те, що крім грозових

перенапруг, які виникають при прямих ударах блискавки в елементи лінії електропередач, мають місце так звані індукційні перенапруги, що виникають при ударах блискавки поблизу електротехнічного об'єкту.

1.2 Аналіз умов виникнення атмосферних перенапруг

Аварійні відключення ліній електропередачі і пошкодження обладнання розподільних мереж 6-10 кВ виникають як при безпосередніх ураженнях ліній і підстанцій грозовими розрядами, так і при розрядах блискавки в землю або між хмарами поблизу ліній (індуковані перенапруги); останні є основною причиною грозових відключень і пошкодження обладнання цих мереж, становлячи до 90% від загальної кількості. З досвіду експлуатації відомо, що відключення через грозові перенапруги становлять 26 - 50% від загальної кількості аварійних відключень, викликаючи значне недовипускання електроенергії споживачам і пошкодження обладнання розподільних мереж.

Для аналізу пошкоджуваності обладнання розподільних мереж нижче розглянуті матеріали, отримані в Україні і за кордоном, а також результати досліджень у міських електричних мережах обленерго за період 2003 —2007 р.

У зв'язку з тим, що електричні машини (генератори, синхронні компенсатори і двигуни) займають особливе місце серед обладнання енергосистем як його найбільш відповідальні й дорогі елементи, їхня питома вага в розподільних мережах 3-20 кВ невисока, і для них потрібні спеціальні найбільш надійні схеми захисту від перенапруг.

Аналіз даних дозволяє зробити наступні основні висновки. Питоме число відключень на 100 км ліній за рік внаслідок грозової діяльності змінюється в межах від 2,5 до 9,5. Досвід експлуатації показує, що через грозові перенапруги відбувається від 15 до 50% загального числа аварійних відключень повітряних ліній (ПЛ) 3-20 кВ. За даними, для ліній 6-20 кВ на

дерев'яних опорах, незахищених по всій довжині, з 10 уражень 7 викликали відключення зі значними перервами в електропостачанні споживачів. Лінії на залізобетонних опорах, як правило, відключаються частіше, ніж на дерев'яних опорах (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 - Питомі показники відключень повітряних ліній 6 - 10 кВ на залізобетонних опорах

Рік	Довжина ПЛ, км	Питоме число відключень на 100 км і 10 грозових годин в рік
2003	4185/10	8,2
2004	4225/150	14,2
2005	4346/226	14,7
2006	2617/741	18,5
2007	2770/835	16,2

Збільшення числа відключень від грозових перенапруг ПЛ 6-10 кВ на залізобетонних опорах не перешкоджає їх широкому поширенню, тому що число стійких ушкоджень при грозах на цих лініях менше, ніж на ПЛ на дерев'яних опорах. Застосування залізобетонних опор позитивно впливає також з точки зору захисту від грозових перенапруг підстанцій внаслідок зниження амплітуди хвиль, що набігають з ліній.

Пошкоджуваність ПЛ 6-10 кВ у міських умовах низька, що свідчить про значне екранування цих ліній багатоповерховою забудовою. Виникаючи в цих місцях індуковані перенапруги істотно згладжуються ємністю кабелів. Помічено підвищену грозову аварійність мереж 6-10 кВ, розташованих у високогірній місцевості. На основі обсягу інформації 2710 км/рік наведене число відключень на 100 км за рік виявилось рівним 6,2 у рівнинній місцевості і 7,5 — у гірській. У передгірній місцевості грозова аварійність трохи нижча. Проведений аналіз грозової аварійності ліній 10 кВ п'яти енергосистем України дає обсяг інформації 8,5 тис. км/рік. Аналіз показав,

що питоме число відключень лінії на дерев'яних опорах в 1,4 рази менше, ніж ПЛ на залізобетонних опорах.

Питоме число пошкоджень елементів ліній має досить стійку величину по роках. Так, по даним обленерго, на частку перекриттів або руйнування ізоляторів при грозових впливах приходиться близько 52%, розщеплень опор - 45%, руйнування трубчастих розрядників - 0,7%, пошкодження кабелів і кабельних муфт - 1,9% і інших пошкоджень - 0,4 %.

Аварійні пошкодження ліній 6—10 кВ в 20—50% випадків обумовлені пошкодженнями ізоляторів. Число руйнувань лінійних ізоляторів змінюється в межах від 0,09 до 18,6 штук на 100 км ліній за рік. Пошкодження цієї ізоляції через грозові перенапруги відбувається в 24% випадків. Неякісне заводське виготовлення і дефекти монтажу обумовлюють -35% ушкоджень ПЛ, пробій ізоляторів - 9,4%. Пробої ізоляторів відбуваються через низьку якість виготовлення і невідповідність характеристик ізоляторів умовам експлуатації. Пошкоджуваність фарфорових ізоляторів, установлюваних на залізобетонних опорах, в 1,4 рази вище, ніж на дерев'яних, а скляних - в 1,5 рази. Пошкоджуваність скляних ізоляторів на опорах з різних матеріалів в 2 рази вище фарфорових.

Щодо скляних ізоляторів можна помітити наступне. Радикальний спосіб виключення пробойів ізоляторів - конструювання непробивних ізоляторів, у яких довжина пробою по твердому діелектрику приблизно дорівнює сухорозрядній відстані. Однак такі ізолятори технологічно не придатні для виготовлення зі скла, тому, штирова конструкція скляних ізоляторів зберігається й надалі. Єдиним способом захисту від пробойу таких ізоляторів є координація напруги перекриття і пробивної.

Грозова пошкоджуваність опор становить від 0,2 до 2,6 опор на 100 км ліній за рік. Недовідпуск електроенергії в мережах 6-10 кВ від розщеплення опор склало 38,4% від загального числа недовідпуску, що виникло на ПЛ від грозових пошкоджень. Одним розрядом блискавки

можуть пошкоджуватися до 4-5 опор. Настільки значні каскадні пошкодження опор досить рідкі. Як показує аварійна статистика, грозові розряди є причиною пошкодження в середньому 9,3 дерев'яних опор, 8,4 дерев'яних опор на залізобетонних приставках і 1,1 залізобетонних опор на кожні 100 ушкоджених опор відповідного типу. З кожної тисячі встановлених опор зазначених типів щорічно через грозу ушкоджуються 0,7-0,9; 0,4 і 0,02-0,05 опор. Найбільша кількість ушкоджень доводиться на кінцеві опори (33,4% від всіх ушкоджень), що пов'язане з відбиттям грозової хвилі від кінця лінії.

Результати експлуатації спеціально не захищених від розщеплення опор показують, що в 2005 р. у мережах 6- 10 кВ обленерго було розщеплено 177 опор, в 2002 р. - 131 опора, а за 3 роки експлуатації близько 3000 спеціально захищених опор жодного випадку виходу з ладу не було.

Одним з найбільш уразливих елементів розподільних мереж 6-10 кВ можуть бути роз'єднувачі, встановлювані на опорах ліній. Велика їх пошкоджуваність значною мірою пов'язана з невисокою якістю виготовлення, у результаті чого на лініях утворюються точки з ослабленою ізоляцією. При грозових впливах на лінію з великою кількістю встановлених на ній роз'єднувачів останні приносять найбільшу аварійність. Для захисту місць із ослабленою ізоляцією необхідна установка трубчастих розрядників. У тих випадках, коли рама роз'єднувача розземлена, а в оперативні тяги врізані дерев'яні вставки довжиною 1,5м, вважається, що перекриття ізоляторів не буде і в установці трубчастих розрядників немає необхідності.

Відключення, пов'язані з виходом з ладу кабельних вводів на підстанції і кабельних переходах, становлять приблизно 2% від загальної кількості грозових відключень. По даним обленерго, в основному ушкоджуються кабелі, які захищені на підході трубчастими розрядниками. Крім того, до 50% випадків пошкоджень пов'язані з відсутністю або неякісним виконанням грозозахисту кабельного вводу. У табл. 1.5 наведені

відомості про пошкоджувальність електроустаткування підстанцій 6-10 кВ за даними трьох енергосистем.

Таблиця 1.5 – Питома пошкоджувальність силових трансформаторів сільських розподільних мереж 6-10 кВ (середнє значення за 5 років)

Потужність трансформатора, кВА	N1	N2	$N3 = \frac{N2}{N1} \cdot 100\%$
20-30	3214	330	10,3
50-60	3340	124	3,7
100	1913	36	1,9
150-180	607	17	2,8
250-400	368	4	1,1

Примітка: N1 - загальна кількість трансформаторів; N2 - кількість ушкоджених трансформаторів; N3 – значення пошкоджуваності у %

Таблиця 1.6 - Класифікація грозових пошкоджень обладнання 6-10 кВ

Вид обладнання	Питоме число пошкоджень, %
Силові трансформатори	26,2
Вимикачі	1
Роз'єднувачі та запобіжники	26,6
Вимірювальні трансформатори струму і напруги	0,8
Ізолятори	19
Вентильні розрядники	19
Інше	7,4
Разом	100

Грозові пошкодження трансформаторів становлять особливий інтерес, тому що трансформатори є найбільш дорогими і відповідальними елементами розподільних мереж 6-10 кВ. Ефективність грозозахисту

трансформаторів у значній мірі визначає надійність електропостачання споживачів у цілому.

Питома пошкоджувальність силових трансформаторів 6-10 кВ значно вища пошкоджувальності трансформаторів інших класів напруги. Виходи їх з ладу в окремих випадках становлять до 27% від загальної кількості пошкоджень під станційного обладнання від перенапруг. Так, по даним однієї з енергосистем України, грозова пошкоджувальність силових трансформаторів за грозовий сезон у безлісних районах досягає 5%.

Вказується, що 77% ушкоджень трансформаторів у мережі 20кВ викликані блискавкою. У цій же роботі відзначається, що число ушкоджень трансформаторів вище на підстанціях з підходами ліній на дерев'яних опорах (2,1 на 100 підстанцій), чим на підстанції з підходами ліній на залізобетонних опорах (0,4 на 100 підстанцій), це пояснюється приходом на підстанцію в першому випадку грозових хвиль із підвищеною амплітудою.

Як бачимо, найбільше часто пошкоджується поздовжня ізоляція обмотки високої напруги (33,7-55,3%), що викликано градієнтними перенапругами від глибоких зрізів напруги при спрацьовуванні трубчастих розрядників і іскрових проміжків (ІП). Головна ізоляція трансформаторів 6-10 кВ ушкоджується рідше (20-34,3%). Ці ушкодження викликані ослабленням ізоляції в процесі експлуатації й інших причин.

Основною причиною ушкодження обмотки низької напруги (7,5-10%) у розглянутих випадках є відсутність грозозахисту з боку 0,4 кВ.

Однієї з найбільш імовірних причин ушкоджень розподільних трансформаторів може бути перехід імпульсних хвиль, що набігають по лініях низької напруги (НН) (0,4 кВ) з обмотки (НН) на обмотку вищої напруги (ВН). При цьому, як правило, ушкоджуються обмотки ВН, найчастіше поблизу нейтралі.

Пряме ураження ліній НН блискавкою малоімовірне (1 раз в 2 роки на 10км довжини ліній НН) через їх невелику висоту і екранованість

будівлями, деревами і т.д. Основним джерелом ушкоджень виявляються індуковані перенапруги, які можуть бути на лініях НН приблизно 1 раз у рік на 1 км з амплітудою 10—60 кВ. У зв'язку з цим виникає необхідність встановлення спеціальних грозозахисних розрядників на стороні НН трансформаторів. Звичайно грозозахист силових трансформаторів з боку ВЛ (0,4 кВ) рекомендується здійснювати заземленням гаків ізоляторів на лініях і установкою розрядників типу РВН-0,5 на вводах НН.

Досить істотним по грозовразливості виявляється місце установки силового трансформатора. Так, по даним обленерго пошкоджуваність трансформаторів, встановлених наприкінці ліній на дерев'яних опорах, досягає 38% від загальної кількості ушкоджень.

Таблиця 1.7 - Вплив тривалості експлуатації на грозову пошкоджуваність силових трансформаторів типу ТМ

Потужність трансформаторів, кВА	Час роботи трансформатора до пошкодження								
	до 5 років			5-10 років			більше 10 років		
	N1	N2	$N3 = \frac{N2}{N1} \cdot 100\%$	N1	N2	$N3 = \frac{N2}{N1} \cdot 100\%$	N1	N2	$N3 = \frac{N2}{N1} \cdot 100\%$
20	61	12	19,7	19	2	10,5	25	4	16
30	110	22	20	156	10	6,4	103	7	7
50	31	5	16	33	2	6,2	28	3	10,7
60	142	12	8,5	27	4	1,5	60	1	1,7
100	121	2	1,7	14	2	1,4	39	1	2,6
Більше 100	342	4	1,2	32	1	3,1	-	-	-

Примітка. Значення N1 і N2 ті ж, що в табл. 1.5., N3 – значення пошкоджуваності в %.

Грозові розряди можуть привести до значної перерви в електропостачанні споживачів. У табл. 1.8 наведені характеристики

тривалості для ліній 6—10 кВ на 100км за рік. Зменшення тривалості значною мірою залежить від ефективності автоматичних повторних включень (АПВ). У табл. 1.9 наведені відомості про роботу АПВ у мережах 6—10 кВ. Як видно, цей показник у мережах 6—10 кВ є низьким. За даними літератури, імовірність успішного АПВ у мережах 35 кВ становить 0,75, а в мережах 10 кВ — 0,81. Вважається, що введення в широких масштабах АПВ із витримкою часу більше 1с дозволить підвищити надійність і безперебійність електропостачання. Цього можна домогтися впровадженням системи АПВ із застосуванням вакуумних вимикачів, здатних забезпечити багаторазові включення.

Таблиця 1.8 - Перерви в електропостачанні при грозових ушкодженнях

Країна	Тривалість перерви, годин
Україна	13,8
Болгарія	4,4-9,3
Англія	1,5
Франція	10
США	0,5

Таблиця 1.9 - Характеристики АПВ в мережах напругою 6—10 кВ

Характеристика	Імовірність успішності АПВ, %	
Успішне АПВ	49,5	52
Лінія ввімкнена повторно (вручну)	11,3	23-28
Стійке пошкодження на лінії, %	39,2	20-25

Виходи з ладу вентиляльних розрядників (РВ) досягають 19% від загальної кількості ушкоджень на підстанціях. Більшість ушкоджень РВ відбувається під час грози (до 70% від загальної кількості). Питома пошкоджуваність РВ в 1,6-3,3 рази вище трубчастих розрядників.

1.3 Аналіз умов виникнення внутрішніх перенапруг

Для мереж 6-10 кВ основне значення мають грозові перенапруги, але аварійність в цих мережах в значній мірі пов'язана також і з внутрішніми перенапругами. Захист від внутрішніх перенапруг в теперішній час набуває все більш вагомого значення, це пов'язано з широким розповсюдженням безконтактних комутаційних апаратів, та інших приладів на напівпровідниках, а також нелінійних обмежувачів перенапруг, які не можуть мати такі ж запаси ізоляції, як основне електрообладнання мереж 6-10 кВ.

Найчастішим видом внутрішніх перенапруг що виникають в мережах 6-35 кВ є перенапруги при дугових замиканнях на землю. Їх доля в аварійності значна і становить від 34% до 80%. Такі перенапруги часто існують у вигляді перехідних процесів і небезпечні для електрообладнання своєю розповсюдженістю на всі елементи мережі, що електрично зв'язані з місцем пошкодження та тривалістю. Число таких перенапруг в рік може коливатись від одиниці до сотень в залежності від протяжності мережі.

В мережах де переважна більшість ліній повітряні частка відключень від переходу однофазного замикання на землю у міжфазне не перевищує 3% від загальної кількості відключень, в той же час як в кабельних мережах ця цифра досягає 60%. Двухфазне замикання на землю частіше виникає в мережах з малими струмами однофазних замикань (приблизно 5-10 А), що свідчить про велике значення внутрішніх перенапруг в цих мережах; зростання струму замикання на землю збільшує процент переходу в

міжфазне замикання в точці горіння дуги.

Перенапруги викликають ослаблення ізоляції, в повітряних мережах частка таких пошкоджень в набагато більша ніж в кабельних. Причому в 49% випадків ізоляція відновлює свої властивості і лінія включається під навантаження в режимі однофазного замикання на землю.

Вагому частку також становлять відключення ліній, на яких в місцях перекриття ізоляція відновлює свої властивості (17,8%), і лінії вмикаються під навантаження в нормальних режимах. Такі відключення зазвичай виникають в результаті поганих погодних умов, при зволоженні ізоляції. Пошук місця та усунення причини пошкодження ослабленої ізоляції доволі важке завдання, таму можливим є багаторазове відключення одних і тих же елементів.

Найбільш пошкоджуваними елементами мереж при дії на них внутрішніх перенапруг є кабелі, місця з'єднання їх один з одним та з іншими елементами мереж. Доля пошкоджень в повітряно-кабельних та кабельних мережах приблизно однакова, а пошкоджуваність кабелів від внутрішніх перенапруг приблизно рівна пошкоджуваності від грозових перенапруг.

Значну частину пошкоджень в повітряно-кабельних мережах складають пошкодження опорних та прохідних ізоляторів (20%), комутаційних апаратів (20%) на підстанціях та електродвигунів, що працюють в кабельних мережах. Питома пошкоджуваність комутаційних апаратів від внутрішніх перенапруг доволі висока і всього в 1,5 рази нижча, ніж від грозових перенапруг. Питома пошкоджуваність іншого обладнання внаслідок дії внутрішніх перенапруг невисока.

Пошкоджуваність обладнання від ферорезонансних перенапруг значно нижча ніж від дугових. Найчастіше виявляють пошкодження трансформаторів напруги при тривалих, або металічних коротких замиканнях на землю, при яких виникає ферорезонанс.

Треба мати на увазі, що внутрішні перенапруги, діючи на ізоляцію

електрообладнання, сприяють виникненню та накопиченню дефектів в ізоляції. Ослаблена ізоляція може бути пошкоджена навіть невеликою по величині грозовою перенапругою, або робочою напругою. Таким чином, внутрішні перенапруги можуть бути причиною більш масштабних пошкоджень. Тому необхідно створювати ефективну систему технічної діагностики для оцінки стану ослабленої ізоляції та прогнозування запасу електричної міцності.

1.4 Сучасний стан захисту від перенапруг в мережах 6-10 кВ

Для обмеження дії внутрішніх перенапруг на електрообладнання в літературі рекомендують ряд наступних заходів:

1. Застосування захисних ємностей на зажимах електрообладнання, наприклад, електродвигунів.
2. Використання вимикачів з шунтуючими опорами.
3. Налаштування розузгодження моментів замикання контактів різних полюсів вимикачів.
4. Застосування вентильних розрядників і нелінійних обмежувачів перенапруг.
5. Використання дугогасильних реакторів.

Вище перераховані методи демпфування внутрішніх перенапруг мають певні недоліки. Використання конденсаторів з достатньо великою ємністю є економічно доцільним, якщо вони одночасно служать для підвищення $\cos \varphi$. В іншому випадку цей метод обмеження перенапруг є економічно недоцільним. Використання вимикачів з шунтуючими опорами також пов'язане з деякими технічними складностями. Використання нелінійних опорів потребує великого активного об'єму, Так як має бути розсіяна достатньо велика потужність; використання ж нелінійних резисторів потребує розробки нових принципів роботи вимикачів, що пов'язано з великими затратами. Налаштування вимикачів не являється ефективним

засобом, цей метод потребує постійного контролю за станом неодночасності включення контактів, що викликає великі труднощі в умовах експлуатації.

Найбільш ефективним з точки зору обмеження внутрішніх перенапруг (наприклад, при відключеннях трансформаторів та електродвигунів) є використання вентильних розрядників, які з різних причин не здобули широкого вжитку, а також нелінійних обмежувачів перенапруг (ОПН). Останні виготовляються з резисторів на основі окису цинку, їх вальт-амперні характеристики не залежать від полярності прикладеної напруги.

Вибір ОПН представляє собою технічно складну задачу. Розглянемо це на прикладі вибору захисного апарату для обмеження внутрішніх перенапруг на електродвигунах. Спеціальні розрахунки показали, що при установці ОПН на зажимах електродвигунів можна очікувати три види впливу на їх резистори.

Вплив високочастотних імпульсів струму, що є наслідком обмеження перенапруг з частотами до 200-250 кГц, пов'язаних з обміном енергією між кабелями. Тривалість дії струмів, викликаних дією напруги в цьому випадку, не перевищує $8/20$ мкс. Амплітуда цих імпульсів при використанні однорідних кабелів не перевищує 400 А. При застосуванні паралельного з'єднання кабелів струми через ОПН можуть досягати 1000-1200 А.

Другим типом впливу є імпульси струмів, що пов'язані з обмеженням вільних коливань в контурах системи кабель-електродвигун. Тривалість дії цих струмів лежить в межах 1-2 мкс. При цьому амплітуда струму досягає 170 А при захисті великих двигунів потужністю більш ніж 1600 кВт, що живляться через довгі кабелі. Для більшості електродвигунів в промисловості та в мережах власних потреб електростанції ці струми не перевищують 100А.

Третій тип впливу пов'язаний з обмеженням короткочасного зростання напруги промислової частоти, що викликане появою неповно

фазних режимів в процесі роботи вимикачів при АПВ і автоматичного включення резерву (АВР). Величина струмів в цьому випадку залежить від загальної ємності нульової послідовності мережі, в якій проводиться комутація, і залишкової напруги електродвигуна при само запуску. Вона, як правило, не перевищує 60 А. Довготривалість цих струмів може лежати в межах 2-3 мс.

На основі вище сказаного можна сформулювати технічні вимоги до резисторів та нелінійних обмежувачів перенапруг. Вони повинні витримувати дію стандартної хвилі напруги 8/20 мкс з амплітудою струму до 1500А, та прямокутної хвилі тривалістю 2 мс з амплітудою струму 100-200 А. Крім того, захисні апарати повинні забезпечити довготривалу роботу при прикладеній до них лінійній напрузі мережу, що збільшилась на 10-20%.

Для обмеження дугових перенапруг, що виникають в мережах 6-10 кВ, використовуються дугогасильні реактори, які в цілому обмежуючи кількість перенапруг не впливають на їх максимальну величину.

Грозозахист підстанцій 6-10 кВ виконується з допомогою трубчатих та вентильних розрядників (нелінійних обмежувачів перенапруг), а в ряді випадків – з допомогою іскрових проміжків. Крім того для захисту підстанцій, в тому числі і підстанції з електричними машинами, використовують позитивний вплив струмобмежуючих реакторів, кабельних вставок та захисних ємностей.

Лінії 6-10 кВ як на залізних так і на дерев'яних опорах не мають тросового захисту і захищаються від грозових впливів з допомогою використання дугогасного реактора, ізолюваної нейтралі чи АПВ. На опорах з ослабленою ізоляцією чи з підвищеною ймовірністю грозового ураження встановлюють іскрові проміжки або трубчаті розрядники.

2 ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОБМЕЖЕННЯ ПЕРЕНАПРУГ

2.1. Класифікація розрядників і вимоги до них

Класи розрядників

Перенапруги в електричних мережах, обмежуються розрядниками, захисний рівень (I_p) яких визначається на стику окремих категорій перенапруг.

Розрядники поділені на класи, кожен з яких призначений для вирівнювання потенціалу відповідної категорії перенапруг.

Клас А. Розрядник призначений для монтажу на зовнішню лінію.

Клас В. Розрядник призначений для вирівнювання потенціалу для категорії перенапруг IV.

- вплив атмосферних перенапруг (електричні лічильники, приймачі дистанційного групового керування, розрядники нижчого рівня);

- якщо об'єкт живиться підземним кабелем, то достатньо розрахувати електричні предмети по категорії перенапруг III.

Клас С. Розрядник призначений для вирівнювання потенціалу обладнання для категорії перенапруг III.

- можливий вплив атмосферних і комутаційних перенапруг (електричні елементи - захисні вимикачі, монтажні вироби, захисні диференційні вимикачі, контактори, вимикачі, штепсельні розетки).

Клас О. Розрядник призначений для вирівнювання потенціалу електричного обладнання для категорії перенапруг II.

- пригашення впливу атмосферних і комутаційних перенапруг (переносні прилади, електричне обладнання з електронними схемами).

Розрядники класу С з варисторами тільки понижують напругу хвилі перенапруги, але не забезпечують скорочення тривалості хвилі струму, Зниження напруги і одночасне скорочення хвилі струму забезпечує

потужний іскровий розрядник розрядника при перенапрузі, яка знижує енергію перенапруги до значення безпечного для розрядника класу С. Для захисту ізоляційних конструкцій від грозових і внутрішніх перенапруг застосовуються розрядники. Вольт-секундна характеристика розрядника повинна йти нижче вольт-секундної характеристики об'єкта, що захищається. За конструкцією розрядники поділяють на: трубчасті, вентильні та обмежувачі перенапруг (ОПН).

2.2. Конструкція трубчастих розрядників

Будова трубчастого розрядника (РТ) показана на рис. 2.1. Корпусом

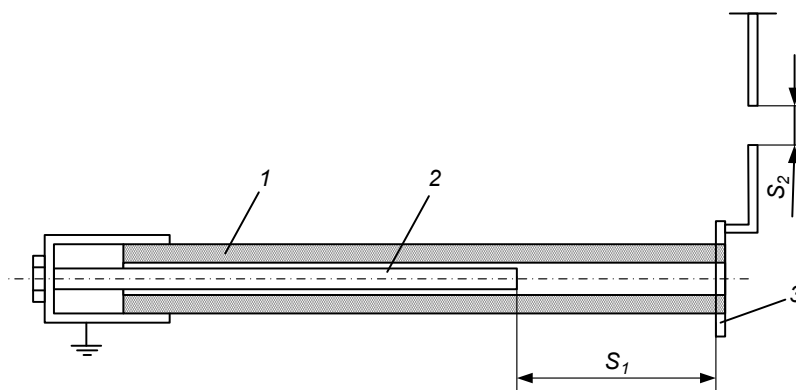


Рисунок 2.1 - Будова трубчастого розрядника

РТ є ізоляційна трубка 1, виконана з газогенеруючого чи матеріалу, що має внутрішню вставку з такого матеріалу. Один кінець трубки закритий металевою кришкою, що

утримує внутрішній стрижневий електрод 2. На відкритому кінці трубки розташований інший електрод у виді кільця 3.

Проміжок між двома цими електродами є дугогасильним проміжком S_1 . Трубка відокремлюється від проводу фази зовнішнім іскровим проміжком S_2 , що перешкоджає розкладанню газогенеруючого матеріалу трубки під дією струмів витоку. При впливі імпульсу грозової перенапруги обидва проміжки пробиваються й імпульсний струм відводиться в землю. При протіканні слідом за імпульсним супровідного струму під дією високої температури дугового розряду відбувається розкладання матеріалу трубки, виділення газу

і підвищення тиску. Гази, спрямовуючи до відкритого кінця трубки, створюють подовжнє дуття, що викликає гасіння дуги при проходженні струму через нульове значення.

Вольт-секундна характеристика РТ залежить від довжин зовнішнього і внутрішнього проміжків і має вид, характерний для проміжків з різко неоднорідним полем.

Для РТ установлюються верхня і нижня межі струмів, що відключаються, залежні від розмірів внутрішнього каналу трубки. Верхня межа обумовлена механічною міцністю корпусу РТ, нижня - тиском, що залежить від струму, що відключається, при якому забезпечується надійне гасіння дуги супровідного струму.

Промисловістю випускаються РТ із фібробакелитовими трубками (типу РТ) і з трубками з вініпласту (типу РТВ). У фібробакелитовому розряднику в якості газогенеруючого матеріалу застосовується фібра. Корпусом РТ є бакелітова трубка. РТ такого типу мають камеру у закритого кінця трубки, що є буфером і сприяє нагромадженню газів, що при проходженні струму через нуль забезпечують інтенсивне подовжнє дуття. РТ із трубками з вініпласту, що має кращі ізоляційні і газогенеруючі властивості, мають більш просту конструкцію, більш високу механічну міцність, і, отже, високу верхню межу струмів, що відключаються.

Особливістю установки РТ є необхідність забезпечення зони вихлопу, у яку не повинні попадати проводи інших фаз і заземлені конструкції, а також зони вихлопів РТ, що захищають інші фази. Розміри цих зон досить значні, наприклад для РТ на 35 кВ її довжина дорівнює 3 і ширина 1,5 м.

Основними недоліками РТ є нестабільні характеристики, наявність зони вихлопу і крута вольт-секундна характеристика. Не випадково, що останнім часом РТ широко замінюються більш досконалими пристроями захисту від перенапруг — вентильними розрядниками.

2. 3. Конструкція вентиляльних розрядників

Вентильний розрядник (РВ) — розрядник, що має однократний чи багатократний іскровий проміжок, включений послідовно з робочим резистором з нелінійною вольт-амперною характеристикою (ВАХ). У деяких розрядниках паралельно іскровим проміжкам приєднуються шунтуючі резистори і конденсатори, що дають можливість керувати розподілом напруг різної тривалості по іскрових проміжках. Шунтуючі резистори вирівнюють розподіл по іскрових проміжках напруг промислової частоти, що повільно змінюються в часі, і внутрішніх перенапруг. Шунтуючі конденсатори використовуються як для вирівнювання напруги, так і для регулювання вольт-секундної характеристики іскрових проміжків, головним чином при впливі на них грозових перенапруг.

При впливі перенапруг, що перевищують пробивну напругу іскрових проміжків, відбувається їхній пробій і через іскрові проміжки і нелінійний резистор починає протікати спочатку імпульсний, а потім супровідний струм. Діюча на ізоляцію перенапряга буде визначатися спаданням напруги від цих струмів на нелінійному резисторі, ВАХ якого має вид, показаний на рис. 2.2.

Технічні вимоги до РВ змінного струму напругою від 3 до 500 кВ визначені ДеСТ 16357-70. Для пояснення нормованих цим ДеСТ основних електричних характеристик розрядників звернемося до спрощеної діаграми зміни струму і напруги на РВ при спрацьовуванні його від грозових перенапруг (рис. 2.3). При підвищенні напруги до рівня розрядної U_p відбувається пробій іскрових проміжків і починає протікати імпульсний струм, амплітудному значенню якого $I_{и}$ відповідає так називана напруга розрядника, що залишається, $U_{з.ал.}$ Крім пробивних напруг, імпульсної і при частоті 50 Гц, залишкової напруги, номінального розрядного струму, номінальної напруги РВ до основних електричних характеристик відносяться також найбільша допустима напруга на РВ чи напруга гасіння, тобто діюче

значення найбільшої напруги на РВ, при якому останній надійно гасить дугу супровідного струму, і захисний коефіцієнт РВ при імпульсному струмі з даними амплітудою і довжиною фронту.

Напруга гасіння визначається режимом роботи РВ. Якщо при грозових впливах відбулися одночасне замикання однієї фази на землю і спрацьовування РВ в інших фазах, то напруга на неушкоджених фазах підвищується. Тому для РВ, що працюють у мережах з ізольованої нейтраллю, напруга гасіння приймається рівним

$$U_{\text{гас}} = 1,1 U_{\text{ном}}$$

де $U_{\text{ном}}$ — номінальна напруга; 1,1 — коефіцієнт, що враховує можливість підвищення напруги за рахунок регулювання напруги приймача енергії.

Для РВ, що працюють у мережах із глухозаземленою нейтраллю, напруга гасіння складає 0,8 м.

Захисний коефіцієнт РВ, що характеризує ефективність його роботи, визначається наступним відношенням:

$$k_{\text{зах}} = U_{\text{зал}} / \sqrt{2} U_{\text{гас}}$$

Зниження захисного коефіцієнта досягається двома шляхами: застосуванням нелінійних резисторів з більш похилою ВАХ і поліпшенням дугогасильних властивостей проміжку. Розглянемо, як ці принципи реалізуються в реальних конструкціях РВ.

Послідовний резистор РВ, як уже вказувалося, повинний мати нелінійну ВАХ і мати здатність багаторазово пропускати струми, що протікають через нього. У процесі роботи при протіканні максимального струму грозової перенапруги опір резистора повинен бути мінімальний, для того щоб залишкова напруга на РВ, в основному обумовлена спаданням напруги на резисторі, не перевищувала заданий рівень. При протіканні супровідних струмів нелінійний резистор повинний зменшувати супровідні

струми до значень, при яких іскрові проміжки будуть надійно гасити дугу супровідного струму.

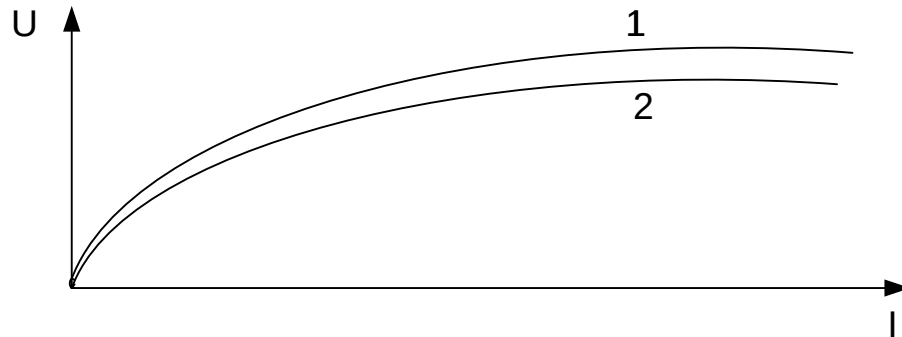


Рисунок 2.2 - Вольт-амперна характеристика нелінійних резисторів вентильного розрядника: 1 - більший (тервіт, тирит) та 2 – менший (віліт) коефіцієнти не лінійності

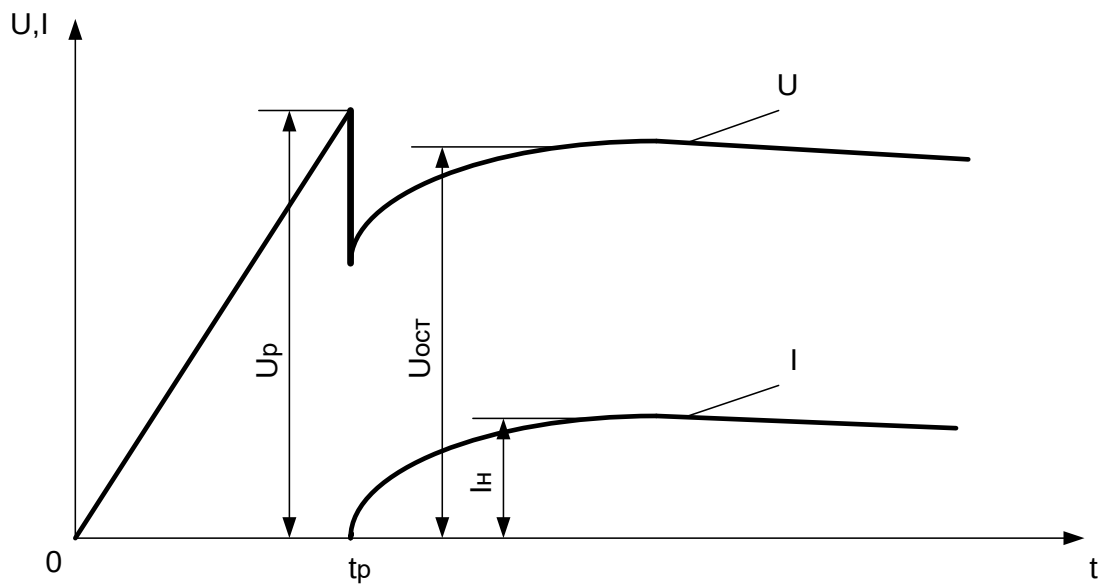


Рисунок 2.3 - Зміна напруги на розряднику, та струму, що протікає через нього при спрацюванні

Такими властивостями різкої зміни опору при різних прикладених напругах («вентильними» властивостями) володіють матеріали на основі карбіду кремнію. Карбід кремнію виходить з окису кремнію шляхом

відновлення її вуглецем при температурі порядку 2000—2500 °С. На поверхні зерен карбіду кремнію утвориться запірний шар, обумовлений наявністю об'ємного заряду в поверхні кристалів, а також наявністю в ряді випадків плівки окису кремнію. Питомий електричний опір зерен карбіду кремнію невеликий і визначається технологією виготовлення порошку карбіду кремнію. Питомий електричний опір запірного шару нелінійно залежить від щільності струму і градієнта прикладеної напруги. При малих напругах він на 6 - 8 порядків вище питомого опору зерен карбіду кремнію. У цих умовах уся напруга прикладається до запірного шару і він визначає опір нелінійного резистора. При підвищенні напруги опір запірного шару різко падає і вже основна маса карбіду кремнію буде визначати опір нелінійного резистора.

Нелінійні послідовні резистори РВ виконуються у виді дисків різного діаметра (до 130 мм) висотою від 10 до 60 мм. Торцеві площини дисків металізуються алюмінієм. Бічна поверхня дисків покривається обмазками, що захищають диски від перекриття по поверхні.

В якості зв'язок зерен карбіду кремнію застосовуються зв'язки, що не вимагають високих температур отжигу, наприклад рідке скло, чи потребує високотемпературного випалу при температурах понад 1000°С. До першої групи матеріалів відноситься віліт, до другого — тервіт і тирит. Віліт і тервіт застосовуються для виготовлення послідовних резисторів, тирит використовується для шунтуючих резисторів.

При високотемпературному отжигу частина запірних плівок вигорає, що підвищує пропускну здатність матеріалу, але зменшує ступінь нелінійності.

Шунтуючі резистори мають форму дужок різної товщини, що охоплюють іскрові проміжки. Кінці шунтуючих резисторів металізовані і мають отвір для кріплення між собою і приєднань до іскрових проміжків.

Статичні ВАХ нелінійних резисторів у діапазоні струмів від десятків амперів до 10—20 кА в подвійному логарифмічному масштабі можуть апроксимуватися двома відрізками прямих різного нахилу з невеликою перехідною областю між ними. Для кожного відрізка справедливе рівняння $U = AI^\alpha$, де α — коефіцієнт нелінійності резистора. Коефіцієнт нелінійності для області малих струмів α_1 завжди більше коефіцієнта для області великих струмів α_2 . Значення A і α залежать від матеріалу нелінійного резистора і питомої електричної провідності його. Для віліту $\alpha_1 = 0,27 - 0,3$, для тервіту — $0,35—0,42$. Для віліту коефіцієнт $\alpha_2 = 0,1-0,2$, для тервіту — $0,15-0,25$.

Кожен імпульс струму залишає в послідовному резисторі слід руйнування в результаті пробою запірного шару окремих зерен карбіду кремнію. Багаторазовий вплив імпульсів струму приводить до повного пробою резистора, що настає скоріше при збільшенні амплітуди і тривалості імпульсу струму. Тому пропускна здатність РВ обмежена і характеризується максимальним значенням імпульсу струму 20/40 мкс чи струму прямокутної форми тривалістю 2 мс (у деяких випадках максимальним значенням імпульсу струму 3/8 мс), що РВ повинний без ушкодження витримати 20 разів.

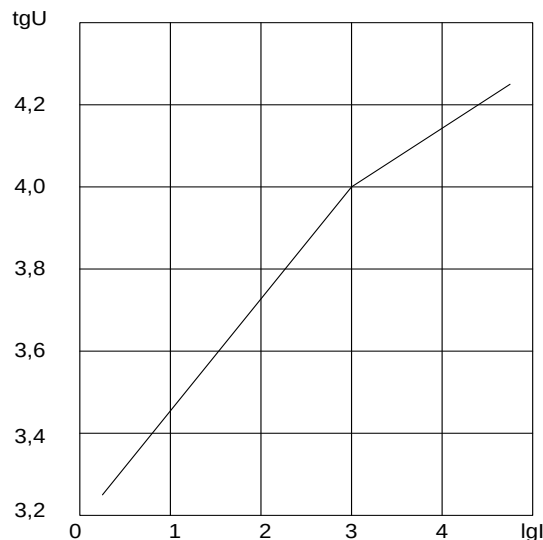


Рисунок 2.4 - Вольт – амперна характеристика вілітового диска діаметром 100 та висотою 60 мм в діапазоні струмів від 1 до 10000 А

Поліпшення дугогасильних властивостей іскрових проміжків забезпечується за рахунок удосконалювання їхньої конструкції. По конструктивних ознаках іскрові проміжки можна розділити на дві групи. До першої відносяться іскрові проміжки, у яких після пробію дуга залишається практично нерухомою і гаситься в тім же місці, де відбувся пробій. Друга, більш численна група використовує магнітне дуття як за рахунок власного магнітного поля, організованого відповідною конфігурацією електродів і їх взаємним розташуванням, так і за рахунок спеціальних пристроїв магнітного дуття, що використовують чи постійні магніти, чи котушки магнітного дуття, по яких протікає супровідний струм.

На рис. 2.5 показаний іскровий проміжок першого типу. Він утворений двома фасонними штампованими електродами з латуні 1 і ізоляційною прокладкою у виді кільця 2 товщиною 0,5—0,6 мм. Матеріал і товщина електродів вибираються так, щоб забезпечити потрібну твердість конструкції, для того щоб розмір зазору між електродами не мінявся ні під впливом механічного зусилля пружини, що притискає електроди, ні. над впливом електродинамічних сил, що виникають при протіканні великих

імпульсних струмів і прагнучих розштовхнути електроди. Товщина електродів також впливає на процеси їхнього нагрівання імпульсними і супровідними струмами і на стабільність розрядної напруги, тому вона береться не менше 0,8 мм. Латунь як матеріал електродів не підданий корозії і забезпечує більш швидке, ніж мідь, відновлення електричної міцності.

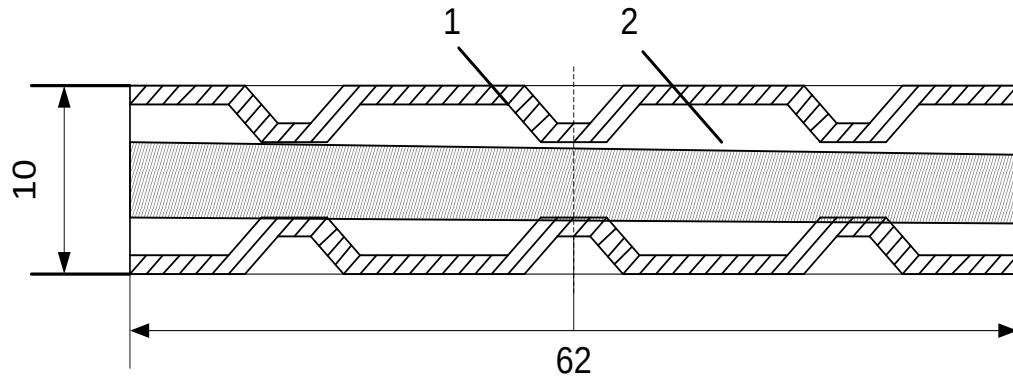


Рисунок 2.5 - Одиничний іскровий проміжок розрядника серії РВП

Ізоляційні прокладки виконуються з міканіту і електрокартону, що мають значну абсолютну діелектричну проникність. У результаті цього на грані торкання електродів з ізоляційною прокладкою через значну напруженість (тангенціальної складової) електричного поля виникають часткові розряди, що стабілізують пробивні характеристики іскрового проміжку і поліпшують його вольт-секундну характеристику. Іскрові проміжки такого типу обривають супровідний струм 80 -100 А.

Конструкція одиничного іскрового проміжку з використанням магнітного дуття, створюваного постійними магнітами, показана на рис. 2.6. Іскровий проміжок утворений двома концентрично розташованими електродами 1 і 2, ізольованими прокладками з електрокартону 5 і міканіту 4. Активізація іскрового проміжку здійснюється за рахунок іонізації в місці контактування підсвічуючих електродів 6 з міканитовою прокладкою. Виникаюча після пробію проміжку дуга починає під дією магнітного поля постійного магніту 5 обертатися з великою швидкістю по кільцевій щілині,

інтенсивно прохолоджуючи. При обриві дуги в проміжку міцність, що відновлюється, наростає значно швидше, ніж у проміжку з нерухомою дугою, тому що в першому випадку температура електродів після переходу струму через нуль істотно нижче, ніж у другому, і процеси термоелектронної емісії електронів утруднені. Іскровий проміжок з обертовою дугою може гасити супровідні струми 250—300 А, що дозволяє зменшити число дисків нелінійних резисторів і, отже, зменшити залишкову напругу. Для РВ із найпростішими іскровими проміжками захисний коефіцієнт при імпульсному струмі с амплітудою 5000 А лежить у межах 2,25—2,4, для РВ із магнітним гасінням дуги він дорівнює 1,7—2,0.

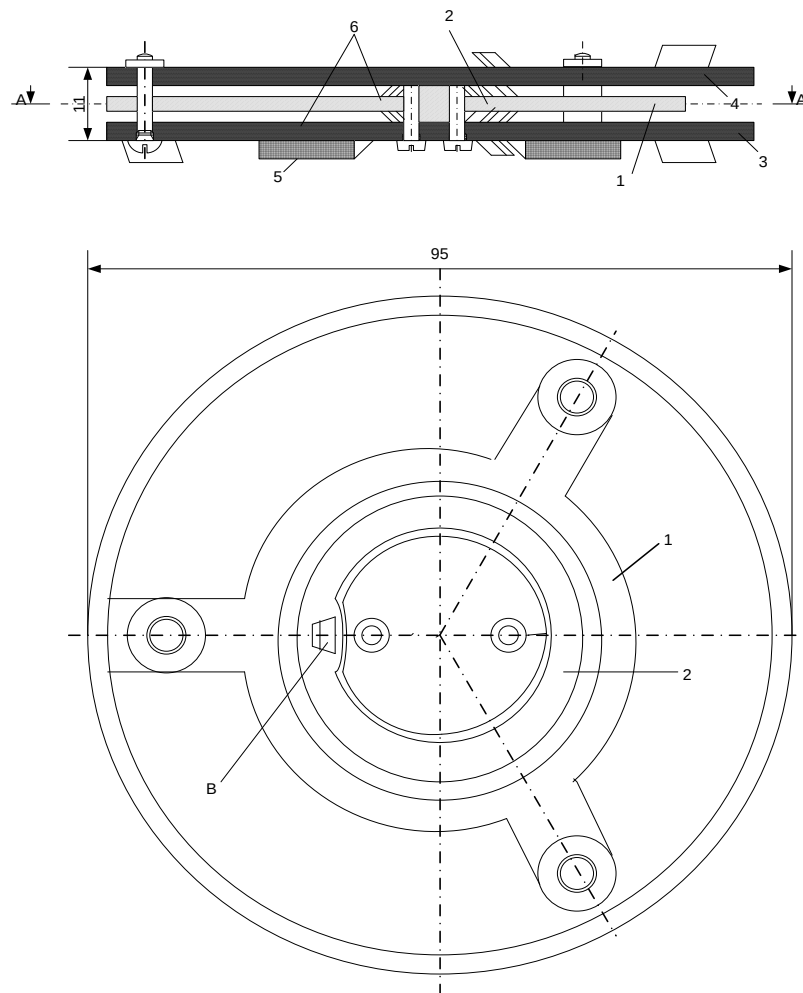


Рисунок 2.6 - Конструкція одиничного іскрового проміжку з дугою, що обертається

Подальше зниження захисного коефіцієнта досягається застосуванням струмообмежуючих іскрових проміжків (рис. 2.7), у яких дуга супровідного струму за допомогою магнітного дуття вводиться у вузьку щілину дугогасильної камери і значно розтягується. Два електроди 1 розташовуються між стінками ДУ 2 у магнітному полі NS, створеному згідно включеними котушками магнітного чи дуття різнойменними полюсами постійних магнітів. Виникаюча сила P змушує дугу переміщатися по електродах, втягуватися у вузьку щілину 8, де напруга на дузі досягає 800—1600 В, і розтягуватися; опір дуги значно зростає і створює ефект обмеження супровідного струму.

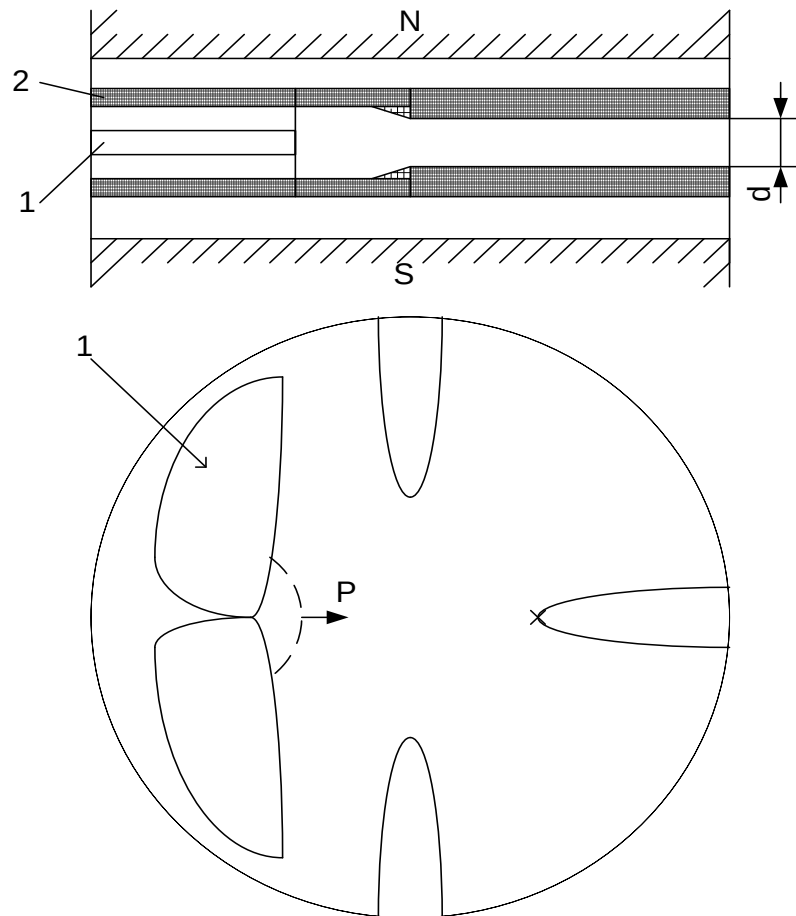


Рисунок 2.7 - Іскровий проміжок з дугою, що розтягується

Можливий процес зміни струму і напруги на іскровому проміжку показаний на рис. 2.8. При впливі хвилі перенапруг u_2 , що має, наприклад, протилежну полярність відносно ЕДС мережі u_1 , відбувається пробій проміжку і протікання імпульсного струму i_1 . Після переходу імпульсного струму через нуль і повторне запалювання утвориться дуга супровідного струму i_2 і на іскровому проміжку створюється спадання напруги u_3 . Після переходу супровідного струму через нуль починається процес відновлення напруги на проміжку, і якщо крива зростання електричної міцності лежить вище кривої напруги, що відновлюється, проміжок більше не пробивається. При наявності ефекту струмообмеження за рахунок активного опору дуги

зсув фаз між струмом і напругою промислової частоти зменшується і полегшуються умови відновлення напруги. Рівномірність розподілу напруги по послідовно з'єднаних іскрових проміжках у процесі гасіння супровідного струму досягається застосуванням шунтуючих резисторів з великим опором.

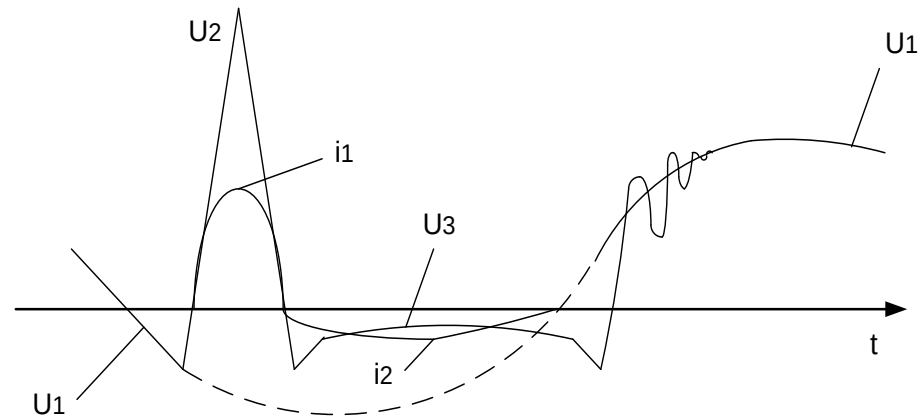


Рисунок 2.8 - Процес зміни струму та напруги на іскровому проміжку при спрацюванні розрядника

В даний час у вітчизняних електроустановках експлуатуються наступні серії РВ: РВП — підстанційні; РВС — станційні, РВМ— магнітні; РВМГ - магнітні грозові; РВМК — магнітні комбіновані; РВТ — струмообмежуючі; РВРД — з розтягуючою дугою.

Розрядники всіх класів напруг по захисних властивостях розділені на чотири групи: I — серії РВТ і РВРД; II —серії РВМ; III —серії РВС; IV - серії РВП. Найкращими властивостями володіють РВ I групи, що мають найменші значення залишкової напруги, найгіршими — IV групи.

Серія розрядників РВП випускається на напруги 3, 6 і 10 кВ. На мал. 2.9 показаний розріз розрядника РВП-6. Набір іскрових проміжків 4 і послідовні резистори 6 розміщені в порцеляновій покривці 7 і стиснуті пружиною 9. Положення влітового резистора усередині покривки фіксується за допомогою фетру 10 чи повсті. Влітові диски розрядників

останнього випуску мають діаметр 55 і висоту 20, 40 і 60 мм, металізовані по площинах зіткнення покриті по бічних поверхнях ізолюючою обмазкою. Іскрові проміжки зібрані усередині ізоляційного циліндра 5. Розрядник герметизований за допомогою прокладок 2 з гуми, стійкої до впливу озону. Верхнє ущільнення закривається металевою кришкою 11, нижнє - діафрагмою 8 і заклинюється металевими натискними елементами 1. Розрядник крениться за допомогою хомута 3. До струмоведучої шини розрядник під'єднується болтом 12, до заземлювальної шини — шпилькою 13.

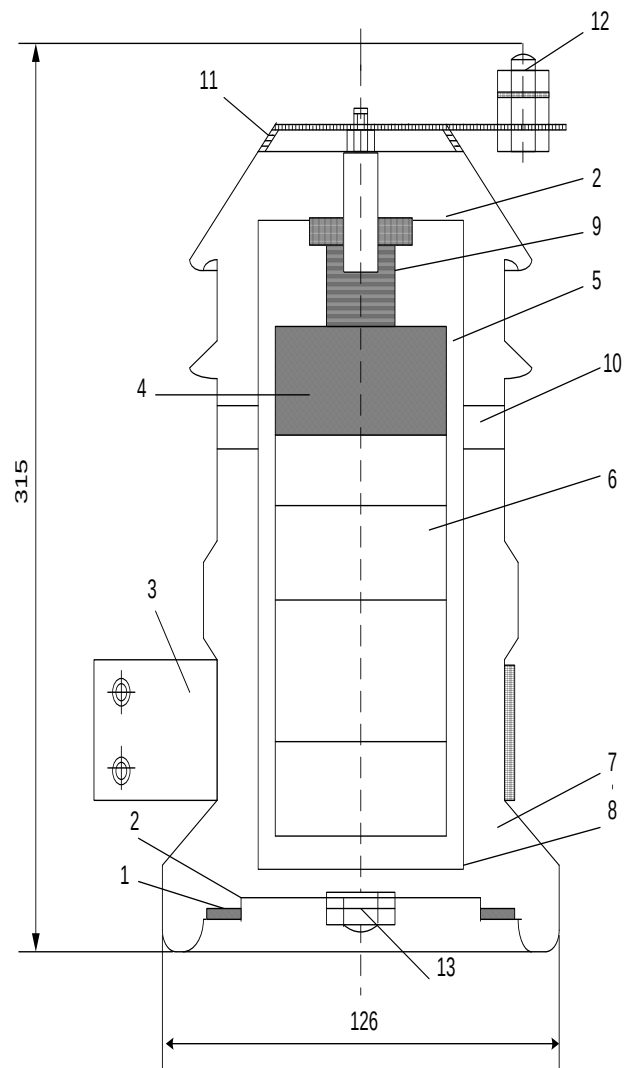


Рисунок 2.9 - Вентильний розрядник РВП – 6

У РВ серії РВС, що випускається у виді п'яти стандартних елементів на 15, 20, 30, 33 та 35 кВ, що комплектуються послідовно на потрібний рівень напруги від 15 до 220 кВ, для створення більш рівномірного розподілу напруги по іскрових проміжках кожна група з чотирьох одиничних проміжків шунтується резистором. Розріз розрядника РВС-15 похитнутий на мал. 2.10. У порцеляновій покритті 3 у верхній і нижній частинах розрядника розташовані блоки іскрових проміжків 5, між якими знаходяться вилітові диски 4. Таке компонування іскрових проміжків знижує коефіцієнт імпульсу розрядника. Необхідне контактне натискання створюється пружинами 6, зашунтованими мідними стрічками. Верхній і нижній кінці покриття армовані сілуміновими фланцями 2, до яких через озоностійку гумову прокладку 7, що забезпечує герметизацію внутрішньої порожнини розрядника, притягається сілумінова чи латунна кришка 1. Блоки іскрових проміжків зібрані в ізоляційних циліндрах і шунтовані резисторами з тиріту.

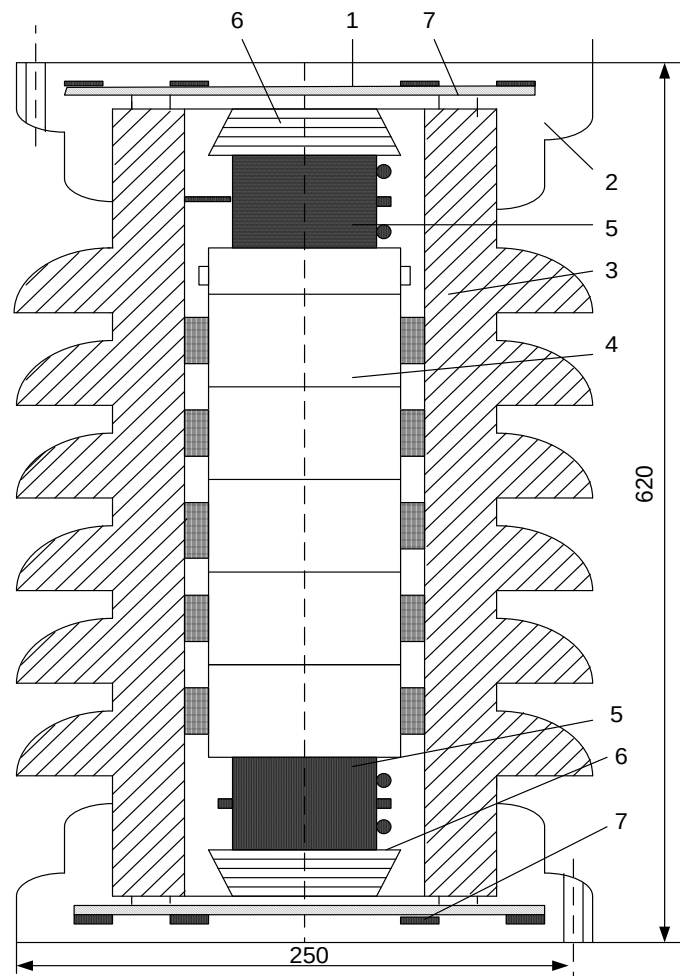


Рисунок 2.10 - Вентильний розрядник РВС – 15

Магнітно-вентильні розрядники на напругу 3— 35 кВ складають серію РВМ, а на напругу 110 - 750 кВ - серію РВМГ.

Розрядники серії РВМ на напругу 3 - 10 кВ призначені для захисту обертових машин, що мають більш низька імпульсна міцність ізоляції, тому ці РВ мають низький коефіцієнт імпульсу (0,6—0,65), що відповідають грозовим перенапругам. З цією метою створюються умови нерівномірного розподілу імпульсних напруг по іскрових проміжках шляхом шунтування іскрових проміжків першої і другої груп (вважаючи від землі) конденсаторами. Елементами, що характеризують цю серію, є послідовні резистори з вілітових дисків діаметром 130 і висотою 50 і 60 мм, іскрові проміжки з обертовою дугою, шунтуючі резистори напівкільцевої форми.

Розрядники серії РВМГ на високі класи напруг виконуються на основі стандартного елемента РВМГ-33. Як нелінійний матеріал використовується тервіт.

Розрядники серії РВМК призначені для захисту електроустановок від грозових і внутрішніх перенапруг, тому вони називаються комбінованими. Вони розроблені на напругу до 1150 кВ. У РВ цієї серії застосовані іскрові проміжки з магнітним гасінням дуги і нелінійні резистори на основі тервіту. Через високий коефіцієнт нелінійності тервіту при протіканні імпульсних струмів грозових перенапруг залишкова напруга досягає значень, неприйнятних з погляду захисту ізоляції, у той час як режим внутрішніх перенапруг, характерний меншими амплітудами струмів, але великими їх тривалостями, є більш відповідним цьому матеріалу нелінійних резисторів. Обмеження залишкової напруги при грозових перенапругах у РВ цієї серії досягається схемним шляхом. Електрична схема з'єднання робочих елементів такого РВ показана на рис. 2.11. При спрацьовуванні РВ від внутрішніх перенапруг пробиваються іскрові проміжки основних елементів 2. Гасіння дуги супровідного струму, обмеженого основними 2 і вентильними 1 елементами, відбувається при напрузі до $1,6U_{\phi}$.

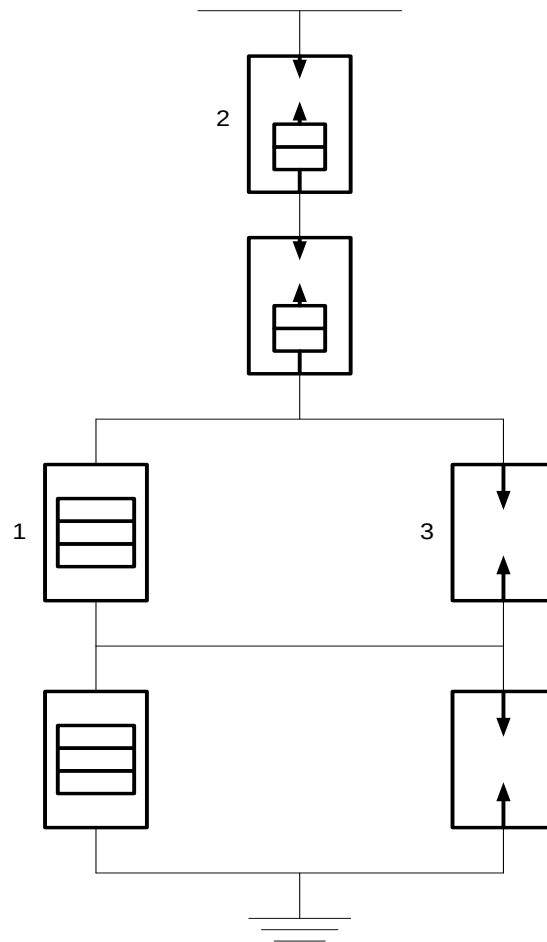


Рисунок 2. 11 - Схема з'єднання робочих елементів розрядника серії РВМК

При спрацьовуванні РВ від грозових перенапруг спочатку пробиваються іскрові проміжки основних елементів 2 і струм проходить через елементи 2 і 1. Як тільки амплітуда наростаючого імпульсу струму досягне приблизно 2000 А, спадання напруги на елементах 1 викликає пробій іскрових елементів 3, резистори елементів 1 шунтуються і напруга на РВ знижується.

Модифікацією цієї серії є РВ із підвищеною напругою гасіння, що досягається збільшенням кількості одиничних іскрових проміжків. Для того щоб при цьому одночасно не збільшувалася розрядна напруга РВ, застосовуються спеціальні іскрові проміжки, що підпалюють.

Розрядники серії РВТ розроблені на напруги 3 - 10 і 110 - 500 кВ. У них застосовані струмообмежуючі іскрові проміжки з вузькощільниною камерою (див. рис. 2.7) і нелінійні тервітові резистори.

Електрична схема РВТ на 3—10 кВ показана на рис. 2.12. Іскрові проміжки з розтягуючою дугою, ІП з'єднані послідовно з котушками магнітного дуття КМ. При пробі ІП і протіканні імпульсів струму з великою швидкістю їхньої зміни на затисках котушок можуть виникати підвищені напруги. Для захисту ізоляції котушок від підвищених напруг паралельно до них включаються обхідні іскрові проміжки ОІП. Шунтуючі резистори $R_{ш}$ забезпечують рівномірний розподіл напруги промислової частоти по іскрових проміжках. Конденсатори C служать для створення різко нерівномірного розподілу імпульсної розрядної напруги по іскрових проміжках, що знижує коефіцієнт імпульсу.

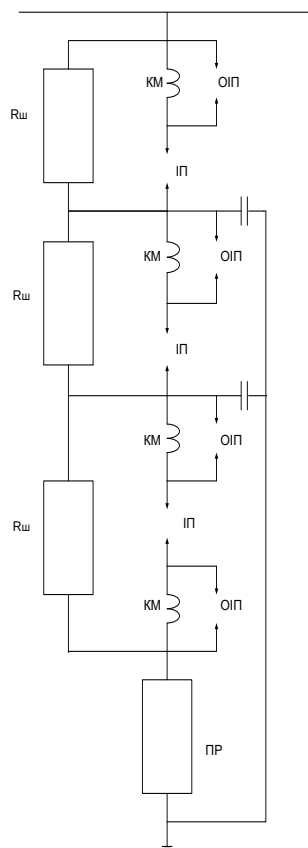


Рисунок 2. 12 - Принципова електрична схема розрядників РВТ 3-10 кВ

Після обриву імпульсного струму і гасіння дуги супровідного струму в ОПН супровідний струм промислової частоти починає протікати через котушки КМ, що створюють магнітне поле, під дією якого в вузькій щілині ДУ відбувається гасіння дуги супровідного струму.

У розрядниках серії РВРД замість катушок магнітного дуття використовуються постійні магніти на основі барієвих феритів. Це підвищує ефективність гасіння дуги, тому напруга гасіння у РВ цієї серії приблизно на 25 % вище, ніж у розрядників серії РВТ. У РВ для мереж постійного струму використовуються також нелінійні резистори. Внаслідок того що дугу із супровідним струмом погасити важко, застосовуються іскрові проміжки з магнітним дугогасінням.

2.4. Конструкція обмежувачів перенапруг

На основі нового матеріалу на базі окису цинку, що має високонелінійну ВАХ, розроблена серія нелінійних обмежників перенапруг (ОПН) на номінальні напруги 110 - 500 кВ, що забезпечують обмеження комутаційних перенапруг до рівня $1,8U_\phi$ і атмосферних перенапруг до рівня $2,0—2,4 U_\phi$. На рис. 2.13 показана ВАХ нелінійного ОПН, з якого видно, що при зниженні перенапруг з $2 U_\phi$ до U_ϕ струм, що протікає через резистори, зменшується на шістьох порядків. Унаслідок цього супровідний струм, що протікає після спрацьовування апарата, невеликий (міліампери), так само як і невелика потужність, що виділяється в резисторах. Це дає можливість відмовитися від послідовних іскрових проміжків, що значно підвищує надійність роботи такого апарата.

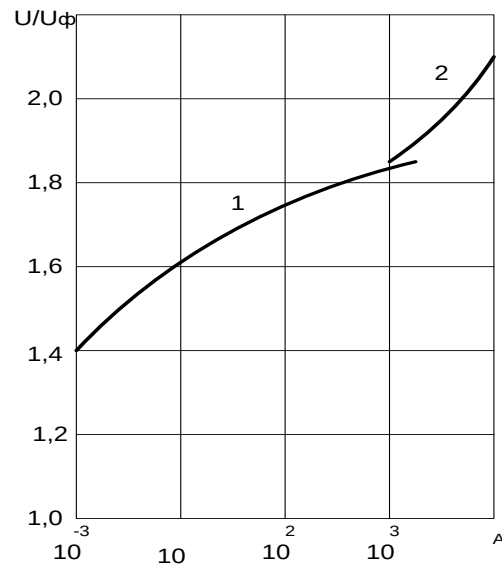


Рисунок 2.13 - Вольт – амперна характеристика ОПН – 500: 1 - в режимі комутаційних перенапруг; 2 – в режимі грозових перенапруг

На рис. 2.14 дана залежність середнього значення струму від напруги промислової частоти для ОПН напругою 110— 500 кВ.

Висока нелінійність резисторів ОПН (коефіцієнт нелінійності для області великих струмів приблизно дорівнює 0,04) приводить до значного зменшення довжини імпульсу струму при спрацьовуванні апарата від комутаційних перенапруг.

При малих напругах (від 0,1 до 1,3 U_ϕ) на ОПН через нього протікають малі струми, що дозволяє відмовитися від розрядних проміжків (рис. 2.14).

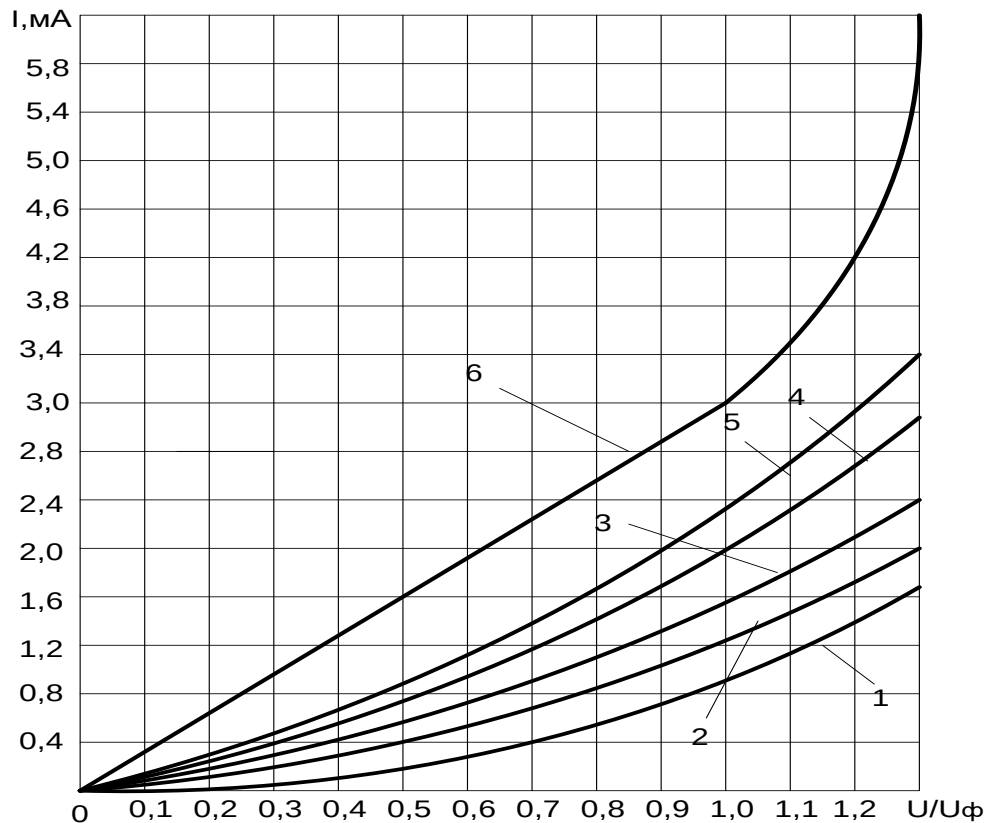


Рисунок 2.14 - Залежність $I(U/U_{\phi})$ для різних ОПН: 1 – ОПН = 110У1; 2 – ОПН = 150У1; 3 – ОПН = 220У1; 4 – ОПН = 1 = 110ХЛЧ; 5 – ОПН = 330У1; 6 – ОПН = 500У;

Конструктивно ОПН усіх класів напруги виконуються в одноелементній порцеляновій покривці. По висоті і діаметру вони близькі до опорних ізоляторів того ж класу напруги й істотно менше відповідних їм РВ. Наприклад, для напруги 220 кВ маса нелінійного ОПН у порівнянні з масою розрядника РВМГ - 220 зменшена в 3 рази, а висота — більш ніж у 2 рази.

Сучасні варистори для ОПН виготовляються за складною технологією з ZnO з малим добавлянням інших окислів і металів. Варистори на основі ZnO мають різко нелінійну вольт-амперну характеристику, так що при зростанні густини струму від 10^{-5} А/см² до 10^2 А/см² напруга на варисторі збільшується приблизно вдвоє. Високий ступінь нелінійності дозволив

використовувати в ОПН варистори в режимі постійного під'єднання до мережі, що й обумовило відмову від іскрових проміжків.

У нормальному робочому режимі струм через обмежувач має ємнісний характер і складає десятки частки міліампера. При виникненні хвиль перенапруг варистори обмежувача переходять у провідний стан і обмежують подальше зростання напруги на його виводах. Коли перенапряга знижується, обмежувач повертається в непровідний стан.

Сучасні варистори мають високу здатність поглинати і розсіювати, без руйнацій і втрат властивостей, значну енергію, яка виділяється при проходженні через них імпульсних струмів, тобто мають високу пропускну здатність. Ця властивість дозволяє створювати на основі варисторів із ZnO достатньо компактні обмежувачі, здатні протистояти впливам грозових і внутрішніх перенапруг.

Конструктивно ОПН являють собою колонку послідовно з'єднаних варисторів, яка установлена в ізоляційний корпус з необхідними пристроями приєднання і монтажу. Порівняно з вентильними розрядниками, ОПН мають ряд переваг, які впливають із відсутності іскрових проміжків і високої нелінійності вольт-амперної характеристики:

- більш глибоке обмеження перенапруг (при однакових розмірах активної частини);
- простота конструкції і велика надійність;
- стійкість до зовнішніх забруднень ізоляційного корпусу;
- здатність обмежувати внутрішні перенапруги;
- при використанні полімерного корпусу
- більша вибухобезпечність;
- менші габарити і маса.

Оскільки варистори ОПН постійно знаходяться під впливом напруги, слід приділяти підвищену увагу спроможності обмежувачів успішно (без утрати теплової стабільності) переносити впливи короточасних та тривалих

підвищень напруги, які тривають від часток секунди до десятків годин. Правильний вибір ОПН, тобто з параметрами, які відповідають конкретній ситуації, дозволяє забезпечити надійний захист електроустаткування і безпечну роботу самого апарату впродовж тривалого часу.

Нелінійні обмежувачі перенапруг типу ОПН/TEL, виробництва підприємства «Таврида Електрик», призначені для забезпечення захисту ізоляції електроустаткування від грозових і внутрішніх (комутаційних та перехідних резонансних) перенапруг в електричних мережах класів напруги 3-35 кВ змінного струму промислової частоти (48-62 Гц) з ізольованою або компенсованою нейтраллю.

При виготовленні обмежувачів використовуються нелінійні металооксидні варистори кращих світових виробників. Сама технологія складання нелінійних варисторів у полімерний корпус обмежувача є унікальною і не має аналогів у світовій практиці. Колонка варисторів міститься між металевими електродами і спресовується в оболонку зі спеціального атмосферостійкого полімерного матеріалу. Полімерний корпус забезпечує необхідні механічні й ізоляційні властивості обмежувача. ОПН/TEL – це герметичний монолітний виріб, який надійно захищений від зовнішніх впливів.

Обмежувачі серії ОПН/TEL є вибухобезпечні: при випробуваннях руйнація апаратів відбувалась без вибухового ефекту. До того ж вони – екологічно безпечні. Спеціальна програма випробувань і контрольних перевірок протягом усього процесу виробництва обмежувачів перенапруг забезпечує високу якість продукції. Вхідному контролю і приймально-здавальним випробуванням піддаються 100% комплектуючих і готових виробів. Нормований термін служби обмежувачів складає 25 років при гарантійному зберіганні та експлуатації 5 років.

При застосуванні ОПН для захисту розподільчих пристроїв підстанцій напругою 6-35 кВ від грозових перенапруг слід керуватись такими вимогами:

- Обладнання розподільчих пристроїв підстанцій 6-35 кВ, до яких приєднані ПЛ, повинні захищатись ОПН, які встановлюються на шинах або біля трансформатора.

- Кількість та місця установки ОПН слід вибирати виходячи з прийнятих на розрахунковий період схеми електричних приєднань, кількості ПЛ і трансформаторів. При цьому допустима відстань від ОПН до устаткування повинна бути забезпечена для кожного етапу (черги) розвитку підстанції.

При виборі необхідно виходити з того, щоб захист підстанції забезпечувався при мінімальній кількості ОПН. При цьому віддається перевага установці ОПН на трансформаторному приєднанні.

- В розподільчих пристроях 35 кВ відстань від ОПН до трансформаторів та інших апаратів, враховуючи довжину ошиновки, повинна бути не більшою, ніж вказана в ПУЕ для вентиляльних розрядників.

- На підстанціях, підходи ПЛ напругою 35 кВ до яких не захищені тросом або ж довжина захищених підходів зменшена, ОПН повинні встановлюватися на приєднаннях трансформаторів не більше ніж в 10 м від них. При перевищенні цієї відстані повинні бути додатково установлені ОПН на шинах.

- На ПЛ, що приєднані до електростанції чи підстанції кабельними вставками довжиною до 50 м, додатково у місці приєднання ПЛ до кабелю повинен бути установлений комплект ОПН з опором заземлення не більше 5 Ом. ОПН повинні найкоротшим шляхом з'єднуватись з металевою оболонкою кабелю та приєднуватись до заземлювача підстанції.

- На ПЛ 35 кВ при наявності трансформатора напруги (ТН) на кінці лінії перед комутаційним апаратом (вимикачем) ОПН повинен бути установленим на відстані не більше 40 м від ТН.

- При установленні ОПН в одній комірці з трансформатором напруги рекомендується приєднувати ОПН до запобіжника, щоб уникнути перегорання запобіжника при проходженні імпульсних струмів.

- При захисті силових трансформаторів від грозових перенапруг ОПН повинен установлюватись до комутаційного апарату і приєднуватись найкоротшим шляхом від введів трансформатора до заземлюючого пристрою підстанції.

- При наявності на приєднаннях трансформаторів на стороні 3-20 кВ струмообмежуючих реакторів ОПН повинні бути установлені на шинах 3-20 кВ, незалежно від наявності ОПН біля трансформаторів.

- Обмотки трансформаторів, які не використовуються, повинні бути з'єднані у трикутник чи зірку (відповідно до заводських схем) і захищені ОПН та заземлені. Захист обмоток, який не використовуються, не потрібен, якщо до них постійно приєднана кабельна лінія довжиною не менше 30 м, що має заземлену оболонку або броню.

- Захист підстанцій 3-20 кВ з нижчою напругою до 1000 В повинен бути виконаним ОПН, що установлені з вищого і нижчого боків підстанції.

- На підстанціях 35 кВ, які виконані за спрощеною схемою з одним вимикачем на декілька трансформаторних приєднань, всі ОПН повинні бути розміщені на відстані не більше 10 м від силового трансформатора. При перевищенні цієї відстані повинні бути додатково установлені ОПН на шинах.

- Для захисту генераторів і синхронних компенсаторів, а також електродвигунів потужністю більше 3 МВт, що приєднуються до ПЛ, повинні використовуватись ОПН ємністю не менше 0,5 мкФ на фазу. ОПН слід встановлювати для захисту: генераторів (синхронних компенсаторів) потужністю понад 15 МВт (понад 15 МВ-А) – на приєднанні кожного генератора (синхронного компенсатора); 15 МВт і менше (15 МВ-А і менше)

– на шинах (секціях шин) генераторної напруги; електродвигунів потужністю понад 3 МВт – на шинах розподільчого пристрою.

- Якщо до загальних шин електростанції чи підстанції приєднані обертові машини і ПЛ з залізобетонними опорами, то на початку захищеного тросом підходу повинен бути установлений комплект ОПН з опором заземлення не більше 3 Ом.

3 УМОВИ ВИБОРУ РОЗРЯДНИКІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

3.1 Розрахунок струмів короткого замикання

Розрахунок струму короткого замикання проводиться для вибору або перевірки параметрів електрообладнання, а також для вибору або перевірки уставок релейного захисту та автоматики.

Складаємо розрахункову схему (спрощену однолінійну схему електроустановки), на якій вказуємо всі елементи, які впливають на струм КЗ, намічаємо точки КЗ (рисунок 3.1).

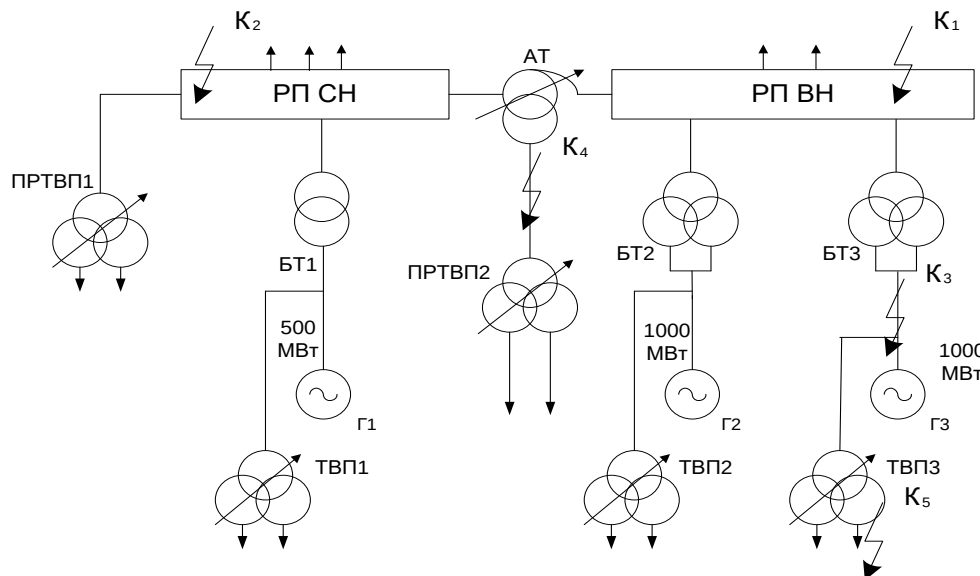


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема

Складаємо еквівалентну заступну схему заміщення, яка відповідає по початковим даним розрахунковій схемі, але в якій всі магнітні (трансформаторні) зв'язки замінюємо електричними.

Розрахунок виконуємо у відносних одиницях. Тому приведемо всі опори елементів схеми заміщення до одних і тих самих базових умов, використовуючи методичні вказівки.

Приймаємо $S_B = 1000$ (МВА).

Визначимо приведені значення опорів:

Пускорезервний трансформатор власних потреб №1:

$$\tilde{O}_{*29} = 0 \quad (3.1)$$

$$\tilde{O}_{*30,31} = \frac{2 \cdot U_{\hat{E}\hat{A}\hat{f} \%}}{100} \cdot \frac{S_{\hat{a}}}{S_{\hat{i}\hat{f}\hat{i}}} = \frac{2 \cdot 11}{100} \cdot \frac{1000}{63} = 3,492 \quad (3.2)$$

Блочний трансформатор №1:

$$\tilde{O}_{*24} = \frac{U_{\hat{E}\hat{A}\hat{f} \%}}{100} \cdot \frac{S_{\hat{a}}}{S_{\hat{i}\hat{f}\hat{i}}} = \frac{11,5}{100} \cdot \frac{1000}{630} = 0,183 \quad (3.3)$$

Блочні трансформатори № 2,3:

$$\tilde{O}_{*4,5} = 0 \quad (3.4)$$

$$\tilde{O}_{*6,7,8,9} = \frac{2 \cdot U_{\hat{E}\hat{A}\hat{f} \%}}{100} \cdot \frac{S_{\hat{a}}}{S_{\hat{i}\hat{f}\hat{i}}} = \frac{2 \cdot 14}{100} \cdot \frac{1000}{3 \cdot 533} = 0,175 \quad (3.5)$$

Генератор №1:

$$\tilde{O}_{*25} = \tilde{O}_d'' \cdot \frac{S_{\hat{a}}}{S_{\hat{A}\hat{f}\hat{i}\hat{i}}} = 0,243 \cdot \frac{1000}{588} = 0,413 \quad (3.6)$$

Трансформатор власних потреб №1:

$$\tilde{O}_{*26} = 0 \quad (3.7)$$

$$\tilde{O}_{*27,28} = \frac{2 \cdot U_{\hat{E}\hat{A}\hat{f} \%}}{100} \cdot \frac{S_{\hat{a}}}{S_{\hat{i}\hat{f}\hat{i}}} = \frac{2 \cdot 10,5}{100} \cdot \frac{1000}{25} = 8,4 \quad (3.8)$$

Трансформатори власних потреб №3, 4:

$$\tilde{O}_{*11,13} = 0 \quad (3.9)$$

$$\tilde{O}_{*14,15,16,17} = \frac{2 \cdot U_{\hat{E}\hat{A}\hat{f} \%}}{100} \cdot \frac{S_{\hat{a}}}{S_{\hat{i}\hat{f}\hat{i}}} = \frac{2 \cdot 12,7}{100} \cdot \frac{1000}{32} = 7,938 \quad (3.10)$$

Система:

$$\tilde{O}_{*1} = \tilde{O}_{*\tilde{N}} \cdot \frac{S_{\hat{a}}}{S_{\hat{A}\hat{f}\hat{i}\hat{i}}} = 0,13 \cdot \frac{1000}{25493} = 0,005 \quad (3.11)$$

ПЛЕП 750 кВ:

$$\tilde{O}_{*2,3} = \tilde{O}_{\hat{i}\hat{e}\hat{o}} \cdot l \cdot \frac{S_{\hat{a}}}{U_{\hat{n}\hat{o}. \hat{i}\hat{f}\hat{i}}^2} = 0,28 \cdot 1200 \cdot \frac{1000}{770^2} = 0,567 \quad (3.12)$$

Генератори №2, 3:

$$\tilde{O}_{*10,12} = \tilde{O}_d'' \frac{S_d}{S_{\hat{A}\hat{I}\hat{I}}} = 0,248 \cdot \frac{1000}{1330} = 0,186 \quad (3.13)$$

Автотрансформатори зв'язку:

$$\begin{cases} \Delta u_{\hat{E}\hat{C}\hat{A}\%} = \frac{1}{2} \cdot (U_{\hat{E}\hat{C}\hat{A}\hat{N}} + U_{\hat{E}\hat{C}\hat{A}\hat{H}} - U_{\hat{E}\hat{C}\hat{C}\hat{H}}) = 0,5 \cdot (10 + 28 - 17) = 10,5 \\ \Delta u_{\hat{E}\hat{C}\hat{C}\%} = \frac{1}{2} \cdot (U_{\hat{E}\hat{C}\hat{A}\hat{N}} + U_{\hat{E}\hat{C}\hat{C}\hat{H}} - U_{\hat{E}\hat{C}\hat{B}\hat{H}}) = 0,5 \cdot (10 + 17 - 28) = 0 \\ \Delta u_{\hat{E}\hat{C}\hat{H}\%} = \frac{1}{2} \cdot (U_{\hat{E}\hat{C}\hat{A}\hat{H}} + U_{\hat{E}\hat{C}\hat{C}\hat{H}} - U_{\hat{E}\hat{C}\hat{B}\hat{C}}) = 0,5 \cdot (28 + 17 - 10) = 17,5 \end{cases} \quad (3.14)$$

$$\tilde{O}_{*\hat{A}} = \tilde{O}_{*19} = \frac{U_{\hat{E}\hat{A}\hat{f}\%}}{100} \cdot \frac{S_d}{S_{\hat{I}\hat{I}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{1000}{3 \cdot 333} = 0,105 \quad (3.15)$$

$$\tilde{O}_{*\hat{N}} = \tilde{O}_{*18} = 0 \quad (3.16)$$

$$\tilde{O}_{*f} = \tilde{O}_{*20} = \frac{U_{\hat{E}\hat{A}\hat{f}\%}}{100} \cdot \frac{S_d}{S_{\hat{I}\hat{I}}} = \frac{17,5}{100} \cdot \frac{1000}{3 \cdot 333} = 0,175 \quad (3.17)$$

Пускорезервний трансформатор власних потреб №2:

$$\tilde{O}_{*21} = 0 \quad (3.18)$$

$$\tilde{O}_{*22,23} = \frac{2 \cdot U_{\hat{E}\hat{A}\hat{f}\%}}{100} \cdot \frac{S_d}{S_{\hat{I}\hat{I}}} = \frac{2 \cdot 12,7}{100} \cdot \frac{1000}{63} = 4,032 \quad (3.19)$$

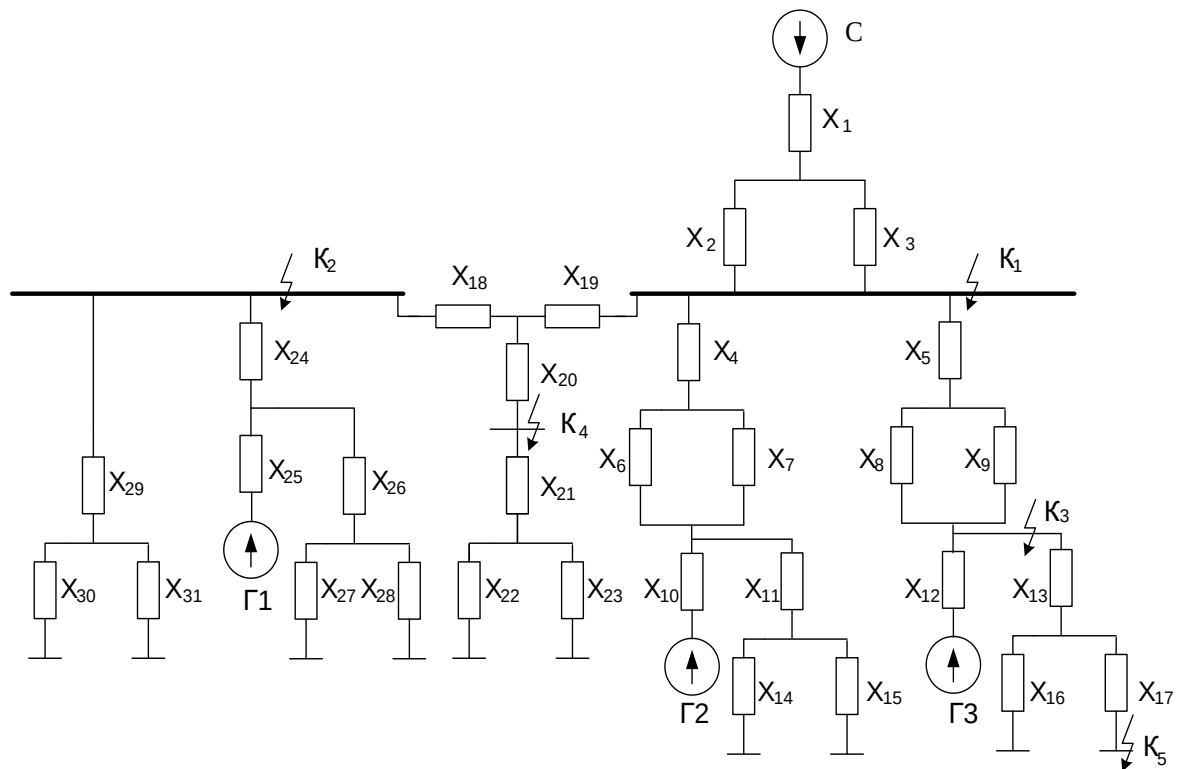


Рисунок 3.2 Заступна схема

3.2 Розрахунок періодичної складової струму КЗ для часу $t = 0$

Початкове значення періодичної складової струму КЗ при розрахунку у відносних одиницях, кА:

$$I_{ПО} = \frac{E''_*}{x_{рез*}} \cdot I_B, \quad (3.20)$$

де E''_* – ЕРС джерела, в.о. [1, табл. 5.1]; $x_{рез*}$ – результуючий відносний опір ланки КЗ, який приведений до базисних умов; I_B – базисний струм, кА:

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_{cp}}. \quad (3.21)$$

К₁ Складаємо розрахункову схему, враховуючи тільки елементи, які мають вплив на точку КЗ K_1 (рисунок 3.3). Приведемо цю схему до найбільш простого вигляду (рисунок 3.4).

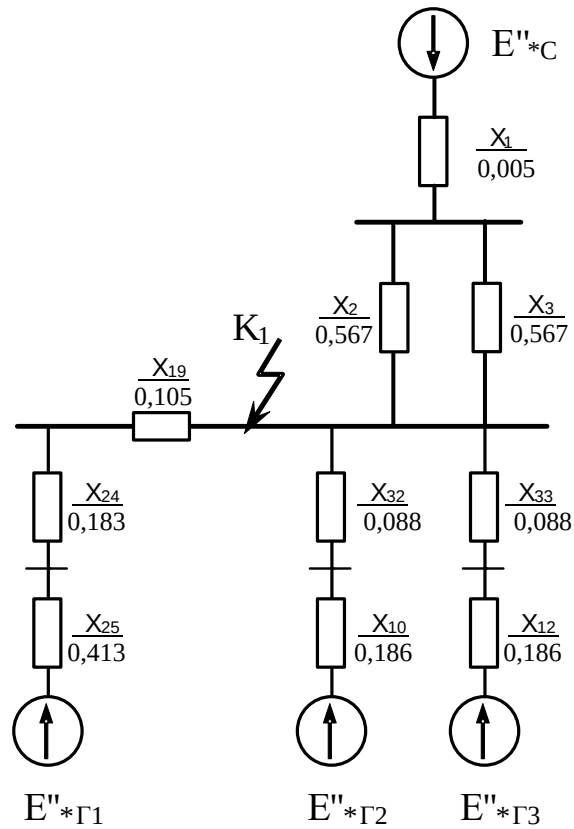


Рисунок 3.3 – Заступна схема для точки КЗ К1

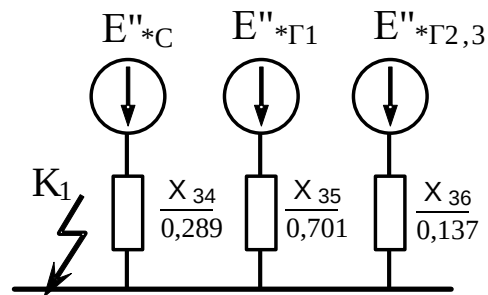


Рисунок 3.4 – Спрощений вигляд

$$\tilde{O}_{32,33} = \frac{\tilde{O}_6}{2} = \frac{0,175}{2} = 0,088;$$

$$\tilde{O}_{34} = \tilde{O}_1 + \frac{\tilde{O}_2}{2} = 0,005 + 0,284 = 0,289;$$

$$\tilde{O}_{35} = \tilde{O}_{24} + \tilde{O}_{25} + \tilde{O}_{19} = 0,183 + 0,413 + 0,105 = 0,701;$$

$$\tilde{O}_{36} = \frac{\tilde{O}_{32} + \tilde{O}_{10}}{2} = \frac{0,088 + 0,186}{2} = 0,137;$$

Базовий струм:

$$I_{A1} = \frac{S_{\hat{a}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\hat{a}\hat{\delta}.\hat{i}\hat{i}}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 770} = 0,75 \text{ (}\hat{e}\hat{A}\text{)};$$

$${}^2\hat{i}\hat{I}_{\hat{A}1} = \frac{E''_{\hat{A}1}}{X_{*35}} \cdot I_{A1} = \frac{1,13 \cdot 0,75}{0,701} = 1,209 \text{ (}\hat{e}\hat{A}\text{)};$$

$${}^2\hat{i}\hat{I}_{\hat{A}2,3} = \frac{E''_{\hat{A}2}}{X_{*36}} \cdot I_{A1} = \frac{1,13 \cdot 0,75}{0,137} = 6,186 \text{ (}\hat{e}\hat{A}\text{)};$$

$${}^2\hat{i}\hat{I}_C = \frac{A''_{*C}}{X_{*34}} \cdot I_{A1} = \frac{1 \cdot 0,75}{0,289} = 2,595 \text{ (}\hat{e}\hat{A}\text{)};$$

Аналогічно проведемо розрахунки для інших точок КЗ.

3.3 Розрахунок ударного струму КЗ, аперіодичної та періодичної складової струму КЗ в момент часу $t = \tau$.

Ударний струм КЗ зазвичай має місце через 0,1 с після початку КЗ. Його значення знаходиться з виразу:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot I_{no} \cdot k_y \quad (3.22)$$

де I_{no} - початкове значення періодичної складової струму КЗ;

k_y - ударний коефіцієнт, який залежить від постійної часу затухання аперіодичної складової струму КЗ.

Якщо КЗ сталося на виводах генератора, то для його вітки постійна T_a може бути взята з [1, таблиця 5.6]. Для характерних точок електричних мереж значення T_a і k_y беремо з [1, таблиця 5.7].

Значення періодичної і аперіодичної складової струму КЗ для часу $t > 0$ в першу чергу необхідно знати для вибору комутаційної апаратури.

Розрахунковий час, для якого необхідно визначити струми КЗ, обчислюється як $\tau = t_{\text{вл відк}} + 0,01 \text{ с}$,

де $t_{\text{вл відк}}$ - власний час відключення вимикача. Для сучасних вимикачів не перевищує 0,2 с.

Аперіодична складова струму КЗ:

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{no} \cdot e^{-\tau/T_a} \quad (3.23)$$

Для вибору τ попередньо виберемо вимикачі (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Параметри вимикачів

Місце встановлення	Тип вимикача	$t_{св\ откл}, c$	τ, c
ВРП 750 кВ	ВНВ-750А-63/4000У1	0,025	0,035
ВРП 330 кВ	ВНВ-330А-40/4000У1	0,025	0,035
ВП	ВЭ-6-40/3200У3(Т3)	0,075	0,085

Підберемо всі необхідні величини і занесемо в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Складові струмів короткого замикання

Точка КЗ	Вітка підживлення	τ, c	T_a, c	K_y	$e^{-\tau/T_a}$	I_{Σ}, kA	$I_{y\bar{a}}, kA$	I_{acc}, kA	$\frac{I_{\Sigma}}{I_{ном}}$	$\gamma_{шт}$	$I_{шт}, kA$
КЗ1	Система	0,035	0,08	1,882	0,646	2,595	6,9085	2,3695	-	1	2,595
	Генератори Г2-Г3	0,035	0,54	1,982	0,937	6,186	17,336	8,1993	3,09	0,94	5,8148
	Генератор Г1	0,035	0,58	1,983	0,941	1,209	3,3903	1,6097	2,74	0,96	1,1606
	Σ					9,99	27,635	12,178			9,5705
КЗ2	Система	0,035	0,08	1,882	0,646	2,761	7,3505	2,521	-	1	2,761
	Генератори Г2-Г3	0,035	0,54	1,982	0,937	6,571	18,415	8,7096	1,45	0,98	6,4396
	Генератор Г1	0,035	0,58	1,983	0,941	3,219	9,0269	4,2858	3,22	0,93	2,9937
	Σ					12,551	34,792	15,516			12,194
КЗ3	Система	0,035	0,08	1,882	0,646	47,354	126,07	43,238	-	1	47,354
	Генератор Г1	0,035	0,5	1,98	0,932	22,082	61,839	29,117	1,56	0,975	21,53
	Генератор Г2	0,035	0,54	1,982	0,937	56,514	158,38	74,907	1,76	0,97	54,819
	Генератор Г3	0,035	0,38	1,974	0,912	146,15	408	188,5	4,56	1	146,15
	Σ					272,1	754,28	335,76			269,85
КЗ4	Система	0,035	0,08	1,882	0,646	27,376	72,882	24,997	-	1	27,376
	Генератори Г2-Г3	0,035	0,54	1,982	0,937	65,13	182,53	86,327	0,67	1	65,13
	Генератор Г1	0,035	0,5	1,98	0,932	31,912	89,367	42,079	1,48	0,985	31,433
	Σ					124,42	344,77	153,4			123,94
КЗ5	Система	0,085	0,1	1,905	0,427	11,404	30,721	6,8932	-	1	11,404
	Двигун	0,085	0,04	1,65	0,119	12,698	29,63	2,1447	-	-	3,7703
	Σ					24,102	60,351	9,038			15,174

Виконаємо розрахунок складових СКЗ і ударного СКЗ для точки КЗ₁:

Ударний струм:

$$i_{yc} = \sqrt{2} \cdot I_{iic} \cdot k_{y\bar{n}} = \sqrt{2} \cdot 2,595 \cdot 1,882 = 6,909 \quad (\hat{e}\hat{A})$$

$$i_{y\bar{A}2,3} = \sqrt{2} \cdot I_{i\bar{i}\bar{A}2,3} \cdot k_{y\bar{A}2} = \sqrt{2} \cdot 6,186 \cdot 1,982 = 17,336 \quad (\hat{e}\hat{A})$$

$$i_{y\bar{A}1} = \sqrt{2} \cdot I_{i\bar{i}\bar{A}1} \cdot k_{y\bar{A}1} = \sqrt{2} \cdot 1,209 \cdot 1,983 = 3,39 \quad (\hat{e}\hat{A})$$

Аперіодична складова:

$$i_{a,\tau\bar{n}} = \sqrt{2} \cdot I_{i\bar{i}\bar{n}} \cdot e^{-\tau/T_a} = \sqrt{2} \cdot 2,595 \cdot 0,646 = 2,37 \quad (\hat{e}\hat{A})$$

$$i_{a,\tau\bar{A}2,3} = \sqrt{2} \cdot I_{i\bar{i}\bar{A}2,3} \cdot e^{-\tau/T_a} = \sqrt{2} \cdot 6,186 \cdot 0,937 = 8,199 \quad (\hat{e}\hat{A})$$

$$i_{a,\tau\bar{A}1} = \sqrt{2} \cdot I_{i\bar{i}\bar{A}1} \cdot e^{-\tau/T_a} = \sqrt{2} \cdot 1,209 \cdot 0,941 = 1,61 \quad (\hat{e}\hat{A})$$

Періодична складова для τ :

$$I_{i\tau C} = I_{ii C} = 2,595 \text{ (}\hat{A}\text{)}$$

$$I'_{ii \bar{A}1} = \frac{P_{ii \bar{A}1}}{\sqrt{3} \cdot U_{\bar{n}\bar{d}\bar{E}\bar{C}} \cdot \cos \varphi} = \frac{500}{\sqrt{3} \cdot 770 \cdot 0,85} = 0,441 \text{ (}\hat{A}\text{)}$$

$$\frac{I_{ii \bar{A}1}}{I'_{ii \bar{A}1}} = \frac{1,209}{0,441} = 2,741; \quad \gamma = 0,96$$

$$I_{i\tau \bar{A}1} = I_{ii \bar{A}1} \cdot \gamma = 1,209 \cdot 0,96 = 1,161 \text{ (}\hat{A}\text{)}$$

$$I'_{ii \bar{A}2,3} = \frac{P_{ii \bar{A}1} + P_{ii \bar{A}2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\bar{n}\bar{d}\bar{E}\bar{C}} \cdot \cos \varphi} = \frac{1200 + 1200}{\sqrt{3} \cdot 770 \cdot 0,9} = 2 \text{ (}\hat{A}\text{)}$$

$$\frac{I_{ii \bar{A}2,3}}{I'_{ii \bar{A}2,3}} = \frac{6,186}{2} = 3,09; \quad \gamma = 0,94.$$

$$I_{i\tau \bar{A}2,3} = I_{ii \bar{A}2,3} \cdot \gamma = 6,186 \cdot 0,94 = 5,815 \text{ (}\hat{A}\text{)}$$

Виконаємо розрахунок складових СКЗ і ударного СКЗ для точки КЗ₅:

Знаходимо початкове значення періодичної складової струмів КЗ:

$$^2_{ii \bar{N}} = 11,404 \text{ (}\hat{A}\text{)}$$

$$^2_{ii \bar{A}} = 12,698 \text{ (}\hat{A}\text{)}$$

Обрахуємо періодичну складову струму КЗ:

$$^2_{i\tau \bar{N}} = ^2_{ii \bar{N}} = 11,404 \text{ (}\hat{A}\text{)}$$

$$^2_{i\tau \bar{A}} = ^2_{ii \bar{A}} \cdot \overset{-\tau}{\underset{0,07}{a}} = 12,698 \cdot \overset{-0,085}{\underset{0,07}{a}} = 3,77 \text{ (}\hat{A}\text{)}$$

де при визначенні $\overset{-\tau}{\underset{0,07}{e}}$ можна використовувати криві, представляючи замість T_a значення $T'_d = 0,07 \text{ с}$

Визначаємо аперіодичну складову струму КЗ до моменту τ :

$$^3_{d\tau \bar{N}} = \sqrt{2} \cdot ^2_{ii \bar{N}} \cdot \overset{-\tau}{\underset{0,07}{a}} = \sqrt{2} \cdot 11,404 \cdot 0,427 = 6,893 \text{ (}\hat{A}\text{)}$$

$$^3_{d\tau \bar{A}} = \sqrt{2} \cdot ^2_{ii \bar{A}} \cdot \overset{-\tau}{\underset{0,04}{a}} = \sqrt{2} \cdot 12,698 \cdot 0,119 = 2,145 \text{ (}\hat{A}\text{)}$$

де T_{aC} , можна визначити по кривим в залежності від потужності що живить обмотки трансформатора в.п. $S_{ном}$. В розрахунку також доцільно використовувати криві.

Знаходимо ударний струм КЗ:

$$I_{\text{оН}}^3 = \sqrt{2} \cdot I_{\text{тН}}^2 \cdot k_{\text{оН}} = \sqrt{2} \cdot 11,404 \cdot 1,905 = 30,721 \text{ (êÀ)}$$

$$I_{\text{оА}}^3 = \sqrt{2} \cdot I_{\text{тА}}^2 \cdot k_{\text{оА}} = \sqrt{2} \cdot 12,698 \cdot 1,65 = 29,63 \text{ (êÀ)}$$

де $k_{\text{уС}}$ визначаємо по кривим; $k_{\text{уД}} = 1,65$.

При розрахунку струмів КЗ на секції, яка живиться через резервний трансформатор, повинні враховуватись двигуни, які приєднані безпосередньо до шин даної секції і до інших секцій, які зв'язані з розрахунковою через магістралі резервного живлення.

Розрахуємо інші точки короткого замикання аналогічно, та занесемо дані в таблицю 3.2.

3.4 Розрахунок термічної дії струмів КЗ

Кількість в провіднику теплоти, що виділилася при КЗ, прийнято характеризувати тепловим імпульсом $B_{\text{к}}$ короткого замикання. Він визначається по-різному в залежності від місця КЗ: віддалене КЗ, КЗ поблизу генератора і КЗ поблизу групи потужних електродвигунів.

$$B_{\text{к}} = I_{\text{но}}^2 \cdot (t_{\text{відк}} + T_{\text{а}}), \quad (3.24)$$

де $t_{\text{відк}}$ – час відключення.

Для перевірки обладнання на термічну стійкість визначимо імпульси квадратичного струму:

1) ВРУ-750 кВ – використовуємо дані по К1:

$$B_{\text{к}} = I_{\text{но}}^2 \cdot (t_{\text{відк}} + T_{\text{а}}) = 9,99^2 \cdot (0,20 + 0,58) = 77,844 (\text{êÀ}^2 \cdot \text{ñ});$$

2) ВРУ-330 кВ – використовуємо дані по К2:

$$\hat{A}_{\hat{E}} = 12,551^2 \cdot (0,20 + 0,58) = 122,872 (\hat{e}\hat{\lambda}^2 \cdot \tilde{n});$$

3) АТЗ – використовуємо дані по К4 і рахуємо по формулі (3.24):

$$\hat{A}_{\hat{E}} = 124,42^2 \cdot (0,20 + 0,54) = 11455,449 (\hat{e}\hat{\lambda}^2 \cdot \tilde{n});$$

4) В колі генератора – використовуємо дані по К3:

$$B_K = B_{Kn} + B_{Ka} \quad (3.25)$$

$$B_{Kn} = B_{nc} + B_{n\sigma} + B_{n\sigma+c} \quad (3.26)$$

$$\hat{A}_{\hat{i}\tilde{n}} = I_{\hat{i}\hat{n}}^2 \cdot t_{\hat{\sigma}\hat{\sigma}\hat{e}\hat{e}} = 47,354^2 \cdot 4 = 8969,605 (\hat{e}\hat{\lambda}^2 \cdot \tilde{n}) \quad (3.27)$$

$$\hat{A}_{\hat{i}\tilde{a}} = \hat{A}_* \cdot I_{\hat{i}\hat{a}}^2 \cdot t_{\hat{\sigma}\hat{\sigma}\hat{e}\hat{e}} = 0,3 \cdot 224,746^2 \cdot 4 = 60612,917 (\hat{e}\hat{\lambda}^2 \cdot \tilde{n}) \quad (3.28)$$

де B_* - відносний імпульс генератора при короткому замиканні.

$$\hat{A}_{\hat{i}\tilde{a}+c} = T_* \cdot I_{\hat{i}\hat{a}} \cdot t_{\hat{\sigma}\hat{\sigma}\hat{e}\hat{e}} \cdot 2 \cdot I_{\hat{i}\hat{n}} = 0,52 \cdot 224,746 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 47,354 = 44273,31 (\hat{e}\hat{\lambda}^2 \cdot \tilde{n}) \quad (3.29)$$

де T_* - відносний імпульс генератора при короткому замиканні.

$$\hat{A}_{\hat{E}\hat{i}} = 8969,605 + 60612,917 + 44273,31 = 113855,832 (\hat{e}\hat{\lambda}^2 \cdot \tilde{n})$$

$$B_{Ka} = T_a \cdot I_c^2 + I_{nog} \cdot T_{a\sigma} + \frac{4 \cdot I_{noc} \cdot I_{nog}}{\frac{1}{T_{ac}} + \frac{1}{T_{a\sigma}}}$$

$$B_{Ka} = 0,35 \cdot 7,2^2 + 0,32 \cdot 123,132 + \frac{4 \cdot 76,985 \cdot 123,132}{\frac{1}{0,06} + \frac{1}{0,32}} = 1971,779 \text{кА}^2 \cdot c$$

5) РУВП-6 кВ;

$$\begin{aligned}
 B_K &= I_{П,О,С}^2 \cdot (t_{вум} + T_{a,СХ}) + I_{П,О,Д}^2 \cdot (0,5 \cdot T'_Д + T_{a,СХ}) + 2 \cdot I_{П,О,Д} \cdot I_{П,О,С} \cdot (T'_Д + T_{a,СХ}) = \\
 &= 13,47^2 \cdot (0,3 + 0,058) + 9,921^2 \cdot (0,5 \cdot 0,07 + 0,058) + 2 \cdot 9,921 \cdot 13,47 \cdot (0,07 + 0,058) = \\
 &= 499,391 + 9,154 + 94,858 = 603,403 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}; \\
 deT_{a,СХ} &= \frac{T_{a,С} \cdot I_{П,О,С} + T_{a,Д} \cdot I_{П,О,Д}}{I_{П,О,С} + I_{П,О,Д}} = \frac{0,063 \cdot 13,47 + 0,04 \cdot 9,921}{13,47 + 9,921} = \frac{2,353 + 0,397}{47,27} = 0,058(\text{с});
 \end{aligned}$$

Таблиця 3.3 – Результати розрахунку теплового імпульсу

т.КЗ	К-1	К-2	К-3	К-4	К-6
В _к , (кА ² ·с)	152,4	64,77	1456	425,2	603,4

3.5 Вибір розрядників

На основі проведених розрахунків проведемо вибір розрядників. Для захисту ізоляції від комутаційних та атмосферних перенапруг застосовують вентильні розрядники. Найбільш широко застосовуються розрядники серії: РВМГ, РВМКП, РВТ та РВРД.

Дані занесемо в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 – Вибір розрядників

Місце встановлення	Тип розрядника
ВРУ-750 кВ	РВМГ-750МУ1
ВРУ-330 кВ	РВМГ-330-40/70ХЛ1
Власні потреби	РВРД-6Т1
Генератор ТГВ-300-2АУЗ	РВМ-20УЗ
Нейтраль трансформатора БТ 330	РВМГ-110МУ1
Нейтраль трансформатора БТ 750	РВМГ-330-У1

Розрядники вибирають за напругою установки. Наприклад, в колі генератора ТГВ-300-2АУЗ приймаємо розрядник типу РВМ-20УЗ.

Обмеження перенапруг дозволяє знизити випробувальні напруги на устаткуванні і значно знизити його габарити і вартість. Основні характеристики розрядника:

Клас напруги - номінальна напруга мережі, у якій установлюється розрядник. Для ТР і ОПН (а також всіх інших АВН) клас напруги і номінальна напруга - те саме. У вентильних розрядниках клас напруги є додатковим параметром, зв'язаним з номінальною напругою розрядника.

Номінальна напруга (напруга гасіння) ВР - найбільше припустиме діюче значення напруги промислової частоти, при якому в робочому режимі гарантується надійна робота ВР.

Імпульсна пробивна напруга розрядника - найбільша імпульсна напруга на розряднику, при якому відбувається пробій його ІП.

Залишкова напруга - найбільша напруга при імпульсному струмі з даним максимальним значенням і тривалістю фронту. Залишкова напруга, змінюється при зміні температури навколишнього середовища, а саме зменшується при підвищенні температури і збільшується при зниженні.

Напруга переключення ВР комбінованого типу в режимі роботи при атмосферних перенапругах - це напруга на ВР, при якому відбувається пробій частини іскрових проміжків і шунтування ними частини НРР.

Номінальний розрядний струм - максимальне значення грозового струму.

Розрахунковий супровідний струм - максимальне значення струму, що відповідно до розрахунку проходить через ВР після пробою його ІП при додаванні до нього півперіоду напруги частотою 50 Гц, рівного номінальній напрузі ВР.

Коефіцієнт імпульсу K_i (розрядника, іскрового проміжку) - відношення пробивної напруги цього пристрою при імпульсному впливі напруги визначеної тривалості $U_{i0.9i}$ до амплітуди пробивної напруги цього пристрою при впливі напруги частотою 50 Гц.

Для одиничного ІП K_i залежить від конструкції і при малому передзарядному часі (0,2-1 мкс) значно перевищує одиницю для всіх конструкцій (до 1,3 і вище), а при великому (2- 20 мкс) залишається майже постійним, трохи перевищуючи одиницю (1,05-1,1).

Вольт-амперна характеристика - залежність спаду напруги на НРР при різному струмі в ньому. У ВР із струмообмежувальними ІП вольт-амперна характеристика визначається сумою спадів напруг на НРР і ІП.

Захисний коефіцієнт (захисне відношення) - відношення напруги, що залишається, при імпульсному струмі з даним максимальним значенням і тривалістю фронту до номінальної напруги ВР або до найбільшої робочої напруги ОПН, помноженому на $\sqrt{2}$. Захисне відношення змінюється при зміні температури навколишнього середовища, а саме при підвищенні температури зменшується на 4-6 %, а при зниженні - підвищується.

Захисний рівень розрядника характеризується перенапругою, що зрізується розрядником. Його прийнято виражати у відносних одиницях, тобто характеризувати кратністю перенапруг.

Отже на основі проведених розрахунків, а саме: розрахунків струмів коротких замикань, термічної дії цих струмів, що проведені в розділі 3, ми вибрали розрядники та занесли дані в таблицю 3.4.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі бакалаврської кваліфікаційної роботи розробляються заходи з охорони праці в процесі обслуговування електричної підстанції. Отже, на оперативно-ремонтний персонал, що здійснює експлуатацію обладнання підстанції, впливають такі шкідливі виробничі фактори [1, 2]: фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо); хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил); фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту

Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Роботи в діючих електроустановках слід проводити за нарядом, розпорядженням та в порядку поточної експлуатації. Роботи, які виконують в порядку поточної експлуатації працівники на закріплених за ними електроустановках, проводять без оформлення наряду або розпорядження. Перелік робіт, які виконують у порядку поточної експлуатації, затверджує керівництво підприємства. За нарядами слід виконувати всі роботи, які не ввійшли до переліку робіт, що виконуються в порядку поточної експлуатації та за розпорядженням.

Забороняється самовільне проведення робіт, а також розширення робочих місць та обсягу завдання, визначених нарядом або розпорядженням.

Виконання робіт в електроустановках в зоні дії іншого наряду слід узгоджувати з працівником, який видав попередній наряд. Узгодження оформлюється до підготовки робочого місця записом на полях наряду (біля таблиці 2) "Узгоджено" та за підписом працівника, який узгоджує.

Ремонт електроустановок із застосуванням вантажопідіймальних машин, механізмів або великогабаритних пристроїв, за винятком ямобурів і телескопічних пристроїв для піднімання людей, слід виконувати за технологічними картами або ППР.

В електроустановках до 1000 В електростанцій, підстанцій і на КЛ під час виконання роботи під напругою необхідно:

- відгородити розташовані поблизу робочого місця струмопровідні частини, що перебувають під напругою, до яких можливий випадковий дотик;
- працювати в діелектричних калошах, ботах або стоячи на ізолювальній підставці чи на гумовому діелектричному килимку;
- застосовувати інструмент з ізолювальними рукоятками (у викруток повинен бути ізольований стрижень). У разі відсутності такого інструменту слід користуватись діелектричними рукавичками.

Забороняється працювати в одязі з короткими або закоченими рукавами, користуватись ножівками, металевими метрами тощо.

В електроустановках понад 1000 В під час проведення робіт на струмопровідних частинах, що перебувають під напругою, за допомогою захисних ізолювальних засобів необхідно:

- користуватись тільки випробуваними сухими та чистими ізолювальними засобами з непошкодженим лаковим покриттям;
- тримати ізолювальні засоби за ручки-захвати не далі обмежувального кільця;

- розмістити ізолювальні засоби так, щоб не виникла небезпека перекриття між фазами або фази на землю.

Під час виконання роботи із застосуванням електрозахисних засобів (ізолювальні штанги, електровимірювальні штанги та кліщі, покажчики напруги) допускається наближатись людині до струмопровідних частин на відстань, визначену довжиною їхньої ізолювальної частини.

Забороняється в електроустановках працювати в зігнутому положенні, якщо у разі випрямлення відстань до струмопровідних частин буде менша за зазначену в інструкціях з ОП. Забороняється в електроустановках електростанцій та підстанцій 6-110 кВ під час роботи біля неогороджених струмопровідних частин розміщуватись так, щоб вони були позаду або з обох боків.

На ПЛ, за винятком зовнішніх вводів 0,4 кВ до будівель, та ПЛЗ перед розриванням або з'єднанням електрично сполучених складників (проводів, тросів) необхідно встановлювати заземлення з обох боків розриву (передбачуваного розриву).

В темний період доби ділянки робіт, робочі місця, проїзди і підходи до них слід освітлювати. Забороняється працювати в неосвітлених місцях.

У випадку наближення грози слід припинити всі роботи на ПЛ, ПЛЗ; у ВРУ, ЗРУ на виводах та лінійних роз'єднувачах ПЛ; на КЛ, під'єднаних до діляниць ПЛ, а також на вводах ПЛЗ в приміщеннях вузлів зв'язку та на антенно-щоглових спорудах.

Всі працівники, які перебувають в діючих електроустановках (за винятком щитів керування, приміщень з релейними панелями та їм подібних), в колодязях, тунелях, траншеях, повинні користуватись захисними касками.

Працівникам підприємств, інших організацій, направлених у відрядження, одноособово можна записувати покази лічильників та інших вимірювальних приладів, встановлених на щитах керування і в РУ. У разі

наявності місцевих оперативних працівників відряджені працівники повинні мати групу II, а у разі відсутності місцевих оперативних працівників - групу III. Працівники, які обслуговують компресорні установки та повітрозбірники, електролізні установки, акумуляторні батареї та зарядні пристрої, повинні мати групу III.

Електробезпека

Основні технічні рішення щодо запобігання електротравмам:

1) виконання технічних заходів під час підготовки робочого місця,
2) застосування під час обслуговування електроустановок електрозахисних засобів.

1) Під час підготовки робочого місця для роботи, яка вимагає знімання напруги, слід виконати у зазначеній послідовності такі технічні заходи:

- провести необхідні вимкнення і вжити заходів щодо запобігання помилковому або самочинному вмиканню комутаційної апаратури;

- вивісити заборонні плакати на приводах ручного і на ключах дистанційного керування комутаційної апаратури. За необхідності струмопровідні частини слід огороджувати;

- приєднати до "землі" переносні заземлення;

- перевірити відсутність напруги на струмопровідних частинах, на які слід встановити заземлення. Якщо переносні заземлення планується ставити поблизу струмопровідних частин, що не входять в зону робочого місця, то їх огороження слід встановити до перевірки відсутності напруги та заземлення;

- встановити заземлення (увімкнути заземлювальні ножі, приєднати до вимкнених струмопровідних частин переносні заземлення) безпосередньо після перевірки відсутності напруги та вивісити плакати "Заземлено" на приводах вимикальних комутаційних апаратів;

- огородити, у разі необхідності, робочі місця або струмопровідні частини, що залишились під напругою, і вивісити на огороженнях плакати

безпеки. Залежно від місцевих умов струмопровідні частини огорожують до або після їх заземлення.

2) Під час обслуговування електроустановок повинні застосовуватись засоби захисту від ураження електричним струмом, від впливу електричного поля, а також засоби індивідуального та колективного захисту. Ізолювальні електрозахисні засоби поділяються на основні і додаткові. До основних ізолювальних електрозахисних засобів, які повинні застосовуватись в електроустановках напругою понад 1000 В, відносяться: ізолювальні штанги всіх видів, ізолювальні кліщі, електровимірювальні кліщі, показчики напруги, пристрої для створення безпечних умов праці під час проведення випробувань і вимірювань в електроустановках (показчики напруги для фазування, показчики пошкодження кабелів та ін.); до додаткових – діелектричні рукавички, діелектричне взуття, діелектричні килими, ізолювальні підставки, ізолювальні накладки, ізолювальні ковпаки, штанги для перенесення та вирівнювання потенціалу, сигналізатори напруги, захисні огороження (щити, ширми), переносні заземлення, плакати та знаки безпеки та інші засоби захисту.

Крім наведених вище засобів захисту в електроустановках повинні застосовуватись такі ЗІЗ: захисні каски – для захисту голови; захисні окуляри і щитки – для захисту очей і обличчя; протигази і респіратори – для захисту органів дихання; рукавиці – для захисту рук; запобіжні пояси та страхувальні канати.

Вибір необхідних електрозахисних засобів, засобів захисту від дії ЕП, а також ЗІЗ регламентується [3], а також іншими відповідними нормативними документами (НД) з урахуванням місцевих умов. У разі застосування основних ізолювальних електрозахисних засобів достатньо використовувати один додатковий засіб, крім випадків, що обумовлені в цих Правилах. У разі необхідності захисту працівника від напруги кроку дозволяється

використовувати діелектричне взуття без застосування основних засобів захисту.

За безпечність конструкції, правильність вибору матеріалів, якість виготовлення, а також за відповідність засобів захисту чинним в Україні нормативним документам повинні нести відповідальність керівники підприємств, установ, організацій (незалежно від форми власності), що виготовляють ці засоби захисту, орган, який видав сертифікат на виробництво та на реалізацію захисних засобів, в тому числі і засобів захисту зарубіжного виробництва.

4.2. Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

Мікроклімат

Тяжкість роботи розділяється на категорії залежно від загальних енерговитрат організму, ккал/с (Вт). Параметри мікроклімату в виробничому приміщенні, де встановлена лінія, наведено в таблиці 4.1.

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату на робочому місці технологічного персоналу передбачається:

- в холодну пору року використання калорифера;
- в літню пору застосування вентиляторів обдува;
- провітрювання приміщення.

Таблиця 4.1 – Нормування параметрів мікроклімату на непостійних робочих місцях

Період року	Категорія робіт	Температура, °C	Відносна вологість	Швидкість руху
Теплий	ІІб	15-29	70 при 25°C	0,2-0,5
Холодний	ІІб	13-23	не більш 75	не більш 0,4

Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується концентраціями (ГДК) в мг/м. В умовах роботи на граничнодопустимих концентраціях

можливими забруднювачами повітря робочої зони можуть бути пил та шкідливі гази, їх ГДК наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0.5	0.15	4
Вуглець (II) оксиду	20		4

Для забезпечення складу повітря робочої зони передбачено:

- провітрювання приміщення;
- цілісність вікон для перешкодження попадання пилу в приміщення під час роботи лінії;
- встановлення пиловловлюючих засобів.

Виробниче освітлення

Характеристика зорових робіт під час експлуатації електрообладнання – малої точності. Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 розряд зорової роботи IV, підрозряд «г».

Таблиця 4.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Х-ка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Х-ка фону	Штучне при комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Малої точності	Від 1,0 до 5 включно	V	г	середній великий великий	світлий світлий середній	-	200	3	1,8

При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

Виробничий шум

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум. Загальні вимоги безпеки» (таблиця 4.4).

Таблиця 4.4 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промислових приміщеннях	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Проектом передбачені засоби колективного захисту: акустичні, архітектурно-планувальні й організаційно-технічні.

Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту - «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно:

– безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі;

– для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

4.3. Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують ССБТ «Пожежна безпека. Загальні вимоги». Типові правила пожежної безпеки для промислових підприємств і інструкції на окремих об'єктах.

Приміщення підстанції за вибухонебезпекою та пожежонебезпекою відноситься до категорії Д – речовини і/або матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилу і/або волокон), а також негорючі речовини і/або матеріали в холодному стані (за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються) зазначені вище речовини і/або матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В, з зонами П-III (місця, де зберігаються тверді горючі речовини). Будівля, в якій розташовані ці приміщення, характеризується III ступенем вогнестійкості.

До III ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону. Для перекриттів дозволяється застосовувати дерев'яні конструкції, захищені штукатуркою або негорючими листовими, плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1 (низької горючості), Г2 (помірної горючості). До елементів покриттів не висуваються вимоги щодо межі вогнестійкості, поширення вогню, при цьому елементи горищного покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвилинах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2016 [15] наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості і будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площадки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	пере-криття між поверхів (у т.ч. горищні та над підвалами)	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зовнішні не-несучі	внутрішні не-несучі (перегородки)				плити, насти-ли, прого-ни	балки, ферми, арки, рами
III	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	Не нормуються	

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2016 [15] наведено в таблиці 3.6.

Таблиця 4.6 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи протипожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбур-шлюзу, не нижче
Стіни	2	REI 60	2	1
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекриття	2	REI 60	2	1

Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських будинків і споруд слід приймати за таблицею 3.7 (знаменник).

Таблиця 4.7

Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будинків, сільськогосподарських будівель і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IIIa, IIIб, IV, IVa, V
III	8/9	8/12	10/15

Найбільшу відстань до евакуаційного виходу визначаємо за об'ємом приміщення та ступені вогнестійкості будівлі.

В приміщенні, відстань при щільності людського потоку в загальному проході, чол/м² наступна: до 1 – 100 м².

На території підстанції встановлено 12 вогнегасників ВП-5 [16].

ВИСНОВКИ

Основною причиною підвищеної пошкоджуваності електрообладнання в мережах середньої напруги є дугові перенапруги, що виникають унаслідок проміжного горіння дуги при пробії фазної ізоляції на землю.

Підвищення надійності функціонування розподільчих мереж напругою 6–10 кВ є складним завданням, що охоплює низку технічних рішень. Ефективне вирішення цієї проблеми потребує індивідуального підходу до кожної мережі з урахуванням її специфіки. До таких рішень належать: впровадження сучасних засобів релейного захисту, оптимізація режиму заземлення нейтралі, використання обмежувачів перенапруг серії ОПН з різними порогами спрацювання, а також застосування вентильних і трубчастих розрядників для захисту від атмосферних та внутрішніх перенапруг. Додатково доцільним є використання систем автоматичного та швидкого шунтування пошкодженої фази.

У межах цієї роботи було проаналізовано конструктивні особливості різних типів розрядників, зокрема трубчастих (РТ), вентильних (ВТ) та обмежувачів перенапруг (ОПН). Для конкретної електричної мережі, розглянутої в третьому розділі, було обґрунтовано вибір таких типів розрядників: РВМГ, РВРД і РВМ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дривецький С. І., Данильченко Д. О., Шевченко С. Ю. Блискавкоіндуковані перенапруги в повітряних лініях із захищеними проводами середнього класу напруги : монографія. – Харків : НТУ "ХПІ", 2020. – 164 с.
2. Gao Y., Jiang J., Sun J., Liu J., Guo Y. Study on lightning protection scheme of multi-terminal MMC-MVDC distribution system // High Voltage. – 2019. – Vol. 4, No. 4. – P. 275–284. DOI: 10.1049/hve.2019.0256.
3. Pourakbari-Kasmaei M., Vafaeipour M., Safdarian A. Enhancing the Protective Performance of Surge Arresters against Indirect Lightning Strikes via an Inductor-Based Filter // Energies. – 2020. – Vol. 13(18). – 4754. DOI: 10.3390/en13184754.
4. Zhang Y., Zhang T., Yang H., Wang L. Indirect lightning performance of 10-kV overhead distribution lines // Frontiers in Energy Research. – 2024. – Vol. 12. – Article 1367183. DOI: 10.3389/fenrg.2024.1367183.
5. Ahmed N. Y., Illias H. A., Mokhlis H. A protocol for selecting viable transmission line arrester for optimal lightning protection // Electric Power Systems Research. – 2023. – Vol. 223. – Article 109562. DOI: 10.1016/j.epsr.2023.109562.
6. Ding Y., Yu X., Wang Z., Li Y. Study on the lightning overvoltage protection of a 500 kV unified power flow controller station // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2018. – Vol. 12(15). – P. 3707–3714.
7. Rizk M. E., Mahmood F., Lehtonen M. Computation of peak lightning-induced voltages due to typical strokes considering high ground resistivity // Electrical Engineering. – 2020. – Vol. 102. – P. 2091–2103. DOI: 10.1007/s00202-019-00783-z.

8. Mahmood F., Sabiha N. A., Lehtonen M. Probabilistic risk assessment of MV insulator flashover under combined AC and lightning-induced overvoltages // *Electrical Engineering*. – 2019. – Vol. 101. – P. 1071–1083.
9. Mahmood F., Lehtonen M. Effect of combined AC and lightning-induced overvoltages on the risk of MV insulator flashover above lossy ground // *Electrical Engineering*. – 2020. – Vol. 102. – P. 1401–1413.
10. Coelho V. L., Raizer A., Paulino J. O. S. Analysis of the lightning performance of overhead distribution lines // *Electrical Engineering*. – 2021. – Vol. 103. – P. 81–92.
11. Mikropoulos P. N., Tsovilis T. E. Statistical method for the evaluation of the lightning performance of overhead distribution lines // *Electrical Engineering*. – 2019. – Vol. 101. – P. 751–760.
12. Michishita K., Ishii M., Hongo Y. Flashover rate of distribution line due to indirect negative lightning return strokes // *Electrical Engineering*. – 2020. – Vol. 102. – P. 1151–1160.
13. Shariatinasab R., Vahidi B., Hosseinian S. H., Ametani A. Probabilistic evaluation of optimal location of surge arresters on EHV and UHV networks due to switching and lightning surges // *Electrical Engineering*. – 2018. – Vol. 100. – P. 1435–1445.
14. Bullich-Massague E., Sumper A., Villafafila-Robles R., Rull-Duran J. Optimization of surge arrester locations in overhead distribution networks // *Electrical Engineering*. – 2019. – Vol. 101. – P. 963–973.
15. Lambert R., Tarasiewicz E., Xemard A., Fleury G. Probabilistic evaluation of lightning-related failure rate of power system apparatus // *Electrical Engineering*. – 2018. – Vol. 100. – P. 311–320.
11. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.
12. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і

шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.

13. ДНАОП 1.1.10-1.01-97 Правила безпечної експлуатації електроустановок. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=21826.

14. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

15. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.

16. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.

17. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.

18. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885

19. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.

20. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.

21. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с.

22. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>.

23. ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів.

Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. URL: <https://www.alutal.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/dstu-8829-2019-1.pdf>.

24. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759.

25. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.

26. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ) РОБОТИ

Назва роботи: «Особливості захисту від атмосферних та внутрішніх перенапруг у мережах середньої напруги»

Тип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна робота

(кваліфікаційна робота, курсовий проєкт (робота), реферат, аналітичний огляд, інше (зазначити))

Підрозділ: Кафедра електричних станцій та систем

(кафедра, факультет (інститут), навчальна група)

Керівник: к.т.н., доцент кафедри ЕСС Лесько В. О.

(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності

StrikePlagiarism	
Оригінальність	82,5 %
Загальна схожість	17,5 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

- ☐ Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи

Автор

(підпис)

Бойко М. М.

(прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

Робота допущена до захисту

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Вишневський С.Я.

(прізвище, ініціали)

Експерт

(за потреби)

(підпис)

(прізвище, ініціали, посада)

Додаток Б

Таблиця Б.1 - Питомі показники відключень повітряних ліній 6 - 10 кВ на залізобетонних опорах

Рік	Довжина ПЛ, км	Питоме число відключень на 100 км і 10 грозових годин в рік
2013	4185/10	8,2
2014	4225/150	14,2
2015	4346/226	14,7
2016	2617/741	18,5
2017	2770/835	16,2

Таблиця Б.2 - Класифікація грозових пошкоджень обладнання 6-10 кВ

Вид обладнання	Питоме число пошкоджень, %
Силові трансформатори	26,2
Вимикачі	1
Роз'єднувачі та запобіжники	26,6
Вимірювальні трансформатори струму і напруги	0,8
Ізолятори	19
Вентильні розрядники	19
Інше	7,4
Разом	100

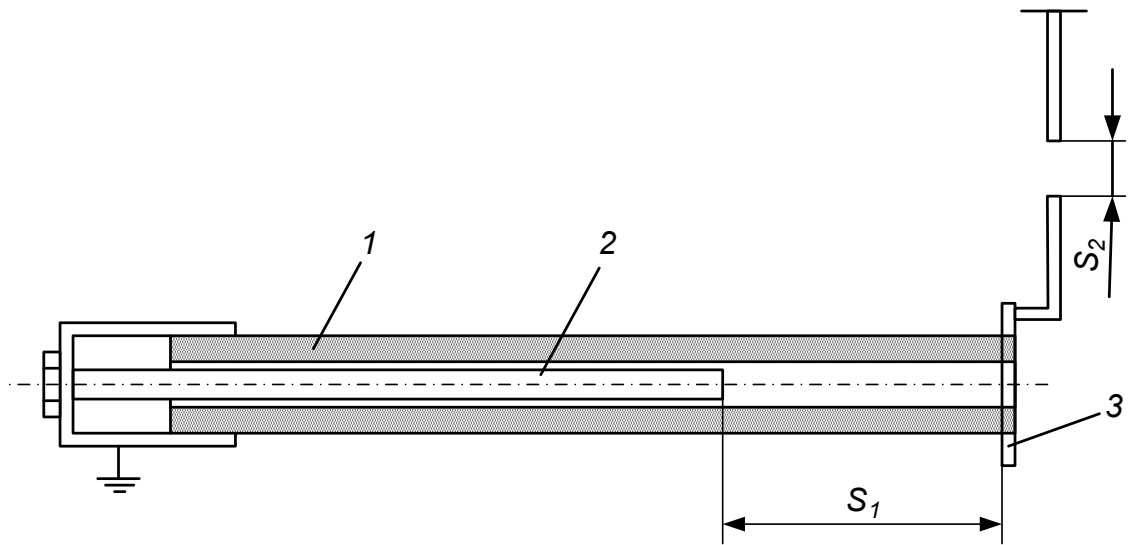


Рисунок 2.1 - Будова трубчастого розрядника

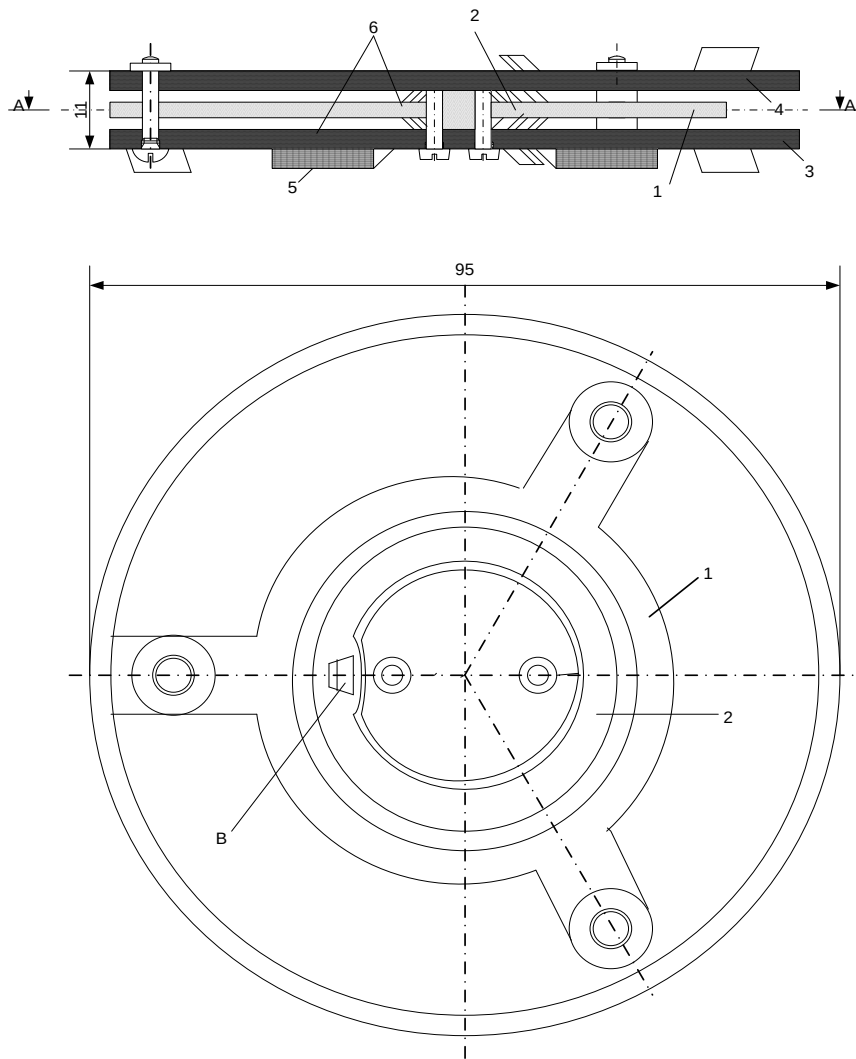


Рисунок 2.6 - Конструкція одиночного іскрового проміжку з дугою, що обертається

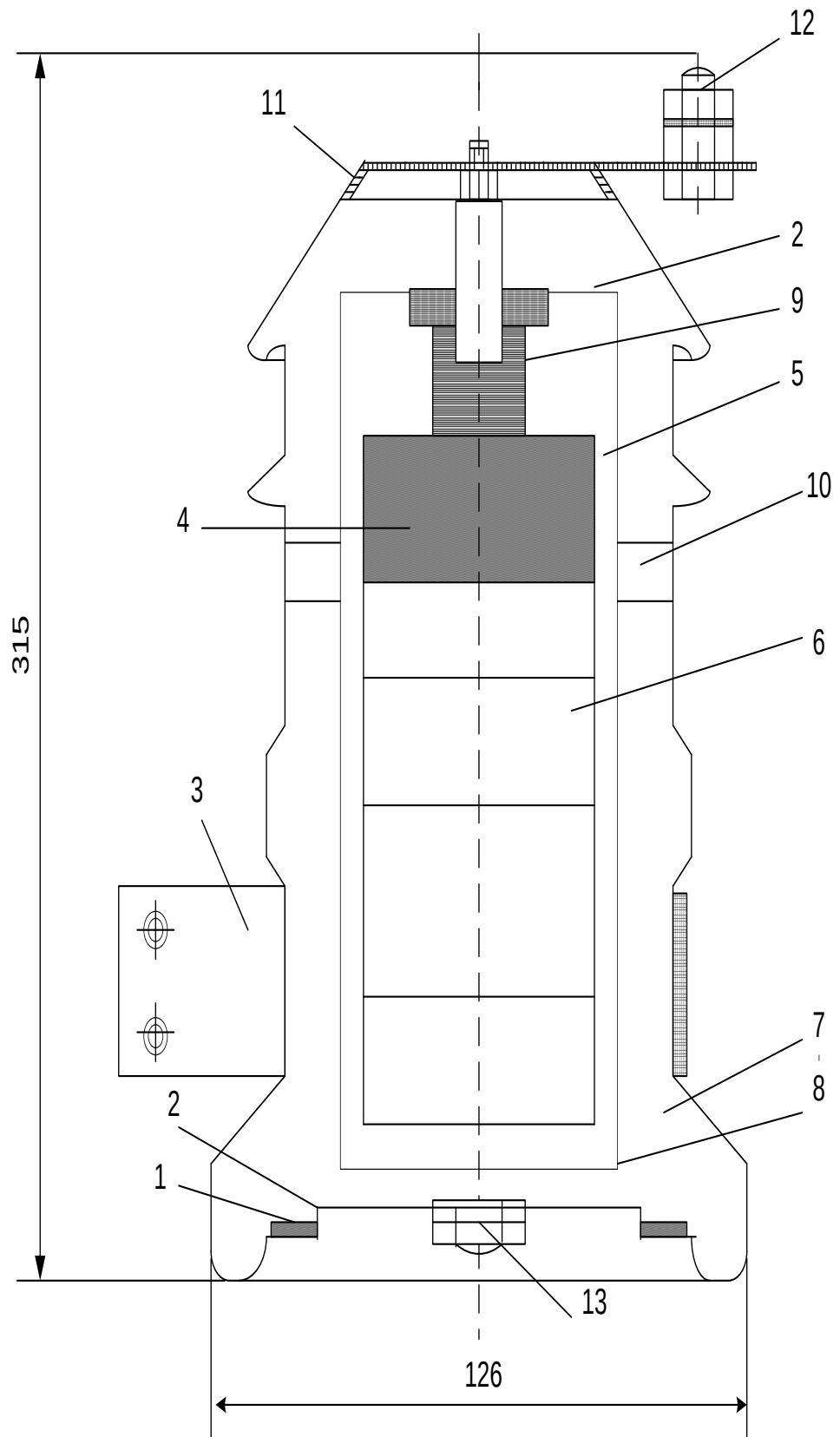


Рисунок 2.9 - Вентильный розрядник РВП – 6

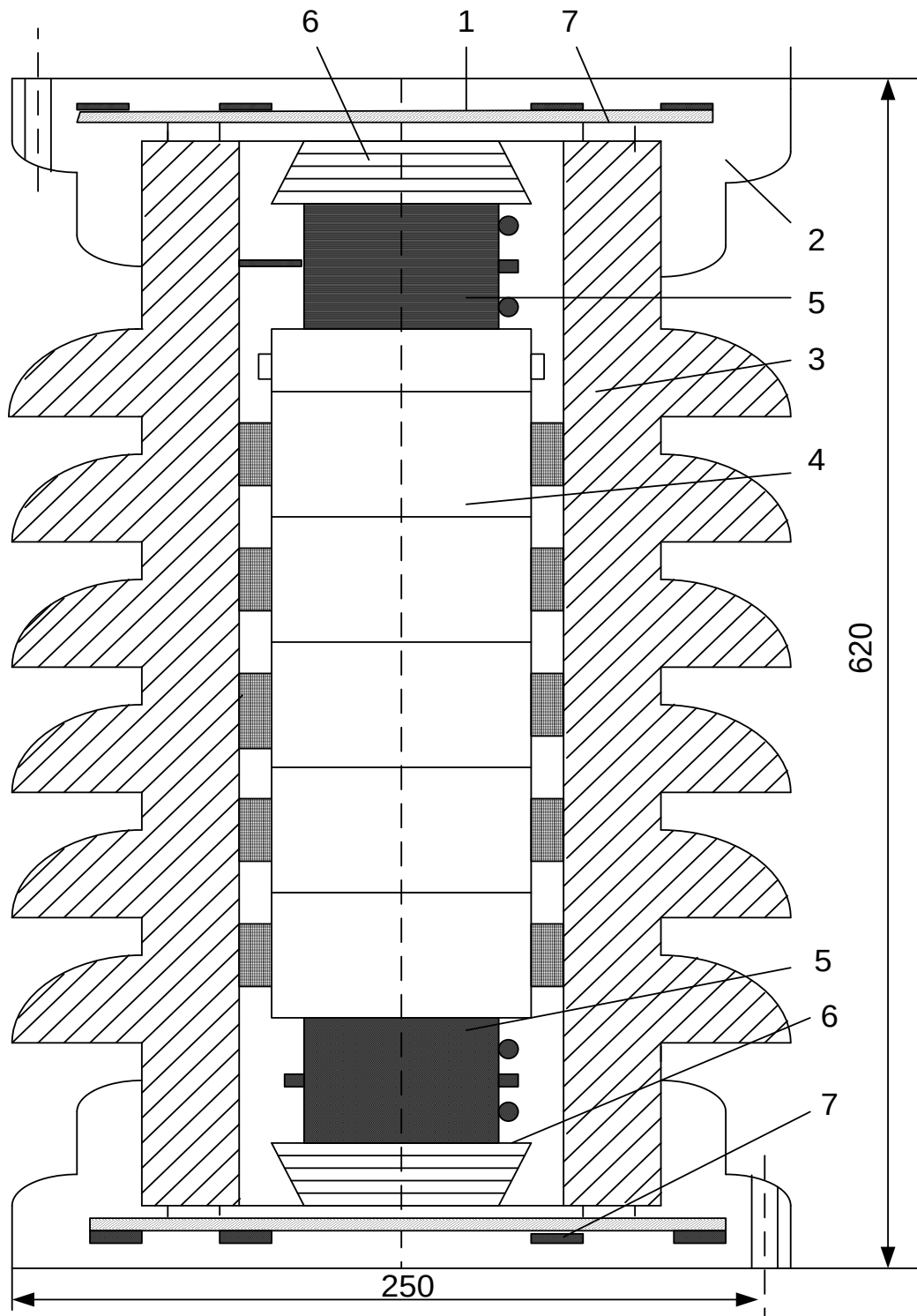


Рисунок 2.10 - Вентильный розрядник РВС – 15

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Студента групи ЕСМ-23-мс

Бойка Миколи Миколайовича

**ОСОБЛИВОСТІ ЗАХИСТУ ВІД АТМОСФЕРНИХ ТА ВНУТРІШНІХ
ПЕРЕНАПРУГ У МЕРЕЖАХ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ**

Захист електричних мереж від перенапруг є надзвичайно актуальним завданням, оскільки дозволяє запобігти пошкодженню обладнання, продовжити термін його служби, зменшити витрати на ремонт і технічне обслуговування. Одним із найефективніших способів обмеження перенапруг є використання розрядників — спеціальних пристроїв, які миттєво реагують на перенапругу і відводять надлишкову енергію в землю. Найпоширенішими типами таких пристроїв є трубчасті розрядники (РТ), вентильні розрядники (ВТ) та обмежувачі перенапруг нелінійні (ОПН), кожен з яких має свої особливості конструкції, принципу дії та області застосування.

Також важливим напрямом є вдосконалення системи заземлення, релейного захисту, використання швидкодіючих пристроїв автоматичного шунтування пошкодженої фази, що дозволяє мінімізувати наслідки перенапруг і скоротити час їх дії. Комплексний підхід до вибору захисту від перенапруг із урахуванням особливостей конкретної мережі дозволяє підвищити загальну надійність і ефективність роботи енергетичної системи.

Актуальність теми даної бакалаврської кваліфікаційної роботи зумовлена потребою в удосконаленні методів і засобів захисту від перенапруг, що особливо важливо для розподільних мереж середньої напруги, які зазнають найбільшого навантаження в умовах зростання кількості електроспоживачів, впровадження відновлюваних джерел енергії та цифровізації енергетичних процесів.

Мета роботи полягає в дослідженні особливостей виникнення атмосферних та внутрішніх перенапруг у мережах середньої напруги, аналізі методів їх обмеження та виборі оптимальних технічних рішень для ефективного захисту електрообладнання.

Завдання роботи:

- Провести огляд природи та класифікації перенапруг у електричних мережах;
- Дослідити конструктивні особливості та принцип дії основних типів розрядників;
- Здійснити порівняльний аналіз ефективності засобів захисту від перенапруг;
- Розглянути приклад застосування захисних пристроїв у конкретній мережі;
- Сформулювати рекомендації щодо вибору оптимального типу захисту з урахуванням особливостей мережі.

Об'єкт дослідження – розподільні електричні мережі середньої напруги (6–10 кВ).

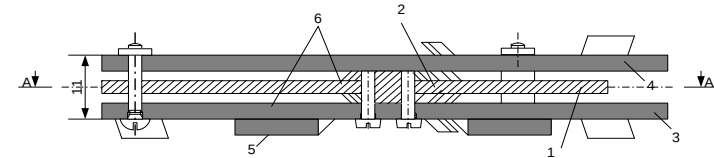
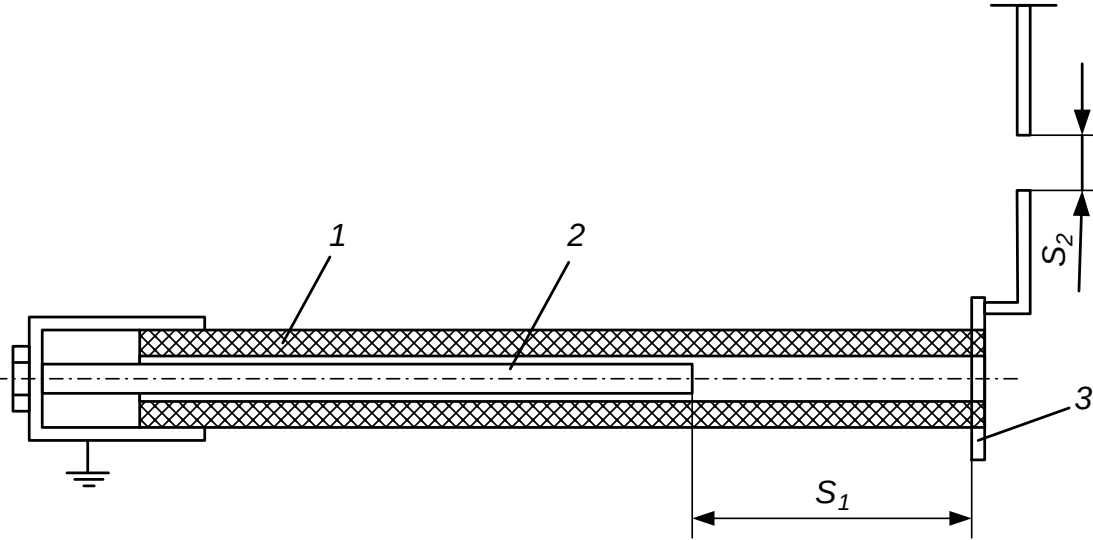
Предмет дослідження – засоби та методи захисту електрообладнання від атмосферних та внутрішніх перенапруг.

Таблиця 1 - Питомі показники відключень повітряних ліній 6 - 10 кВ на залізобетонних опорах

Рік	Довжина ПЛ, км	Питоме число відключень на 6 і 10 грозових годин в рік
2013	4185/10	8,2
2014	4225/150	14,2
2015	4346/226	14,7
2016	2617/741	18,5
2017	2770/835	16,2

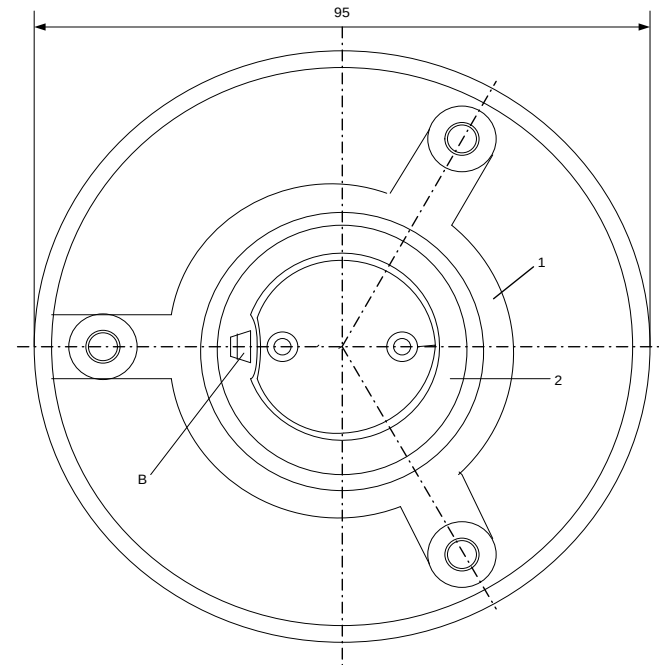
Класифікація грозових пошкоджень обладнання 6-10 кВ

Вид обладнання	Питоме число пошкоджень, %
Силові трансформатори	26,2
Вимикачі	1
Роз'єднувачі та запобіжники	26,6
Вимірювальні трансформатори струму і напруги	0,8
Ізолятори	19
Вентильні розрядники	19
Інше	7,4
Разом	100



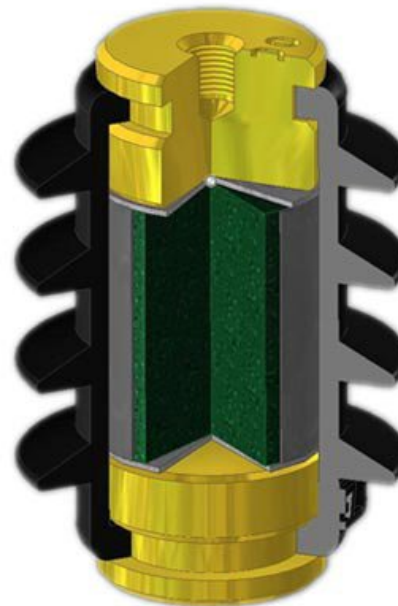
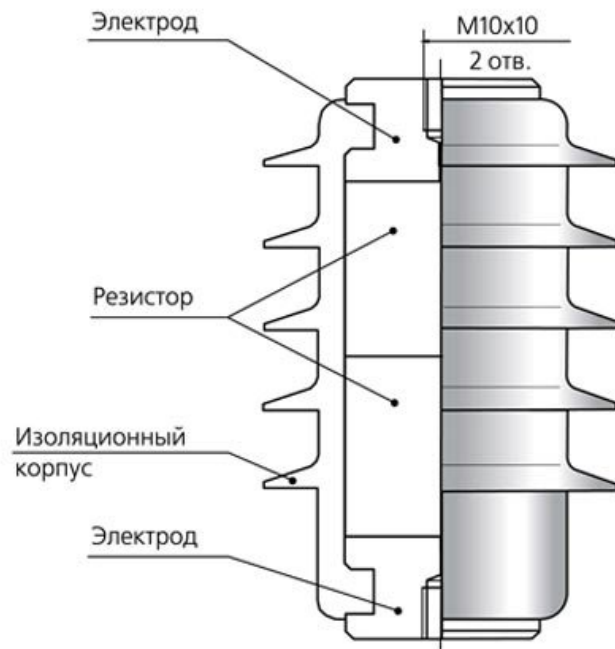
Будова трубчастого розрядника

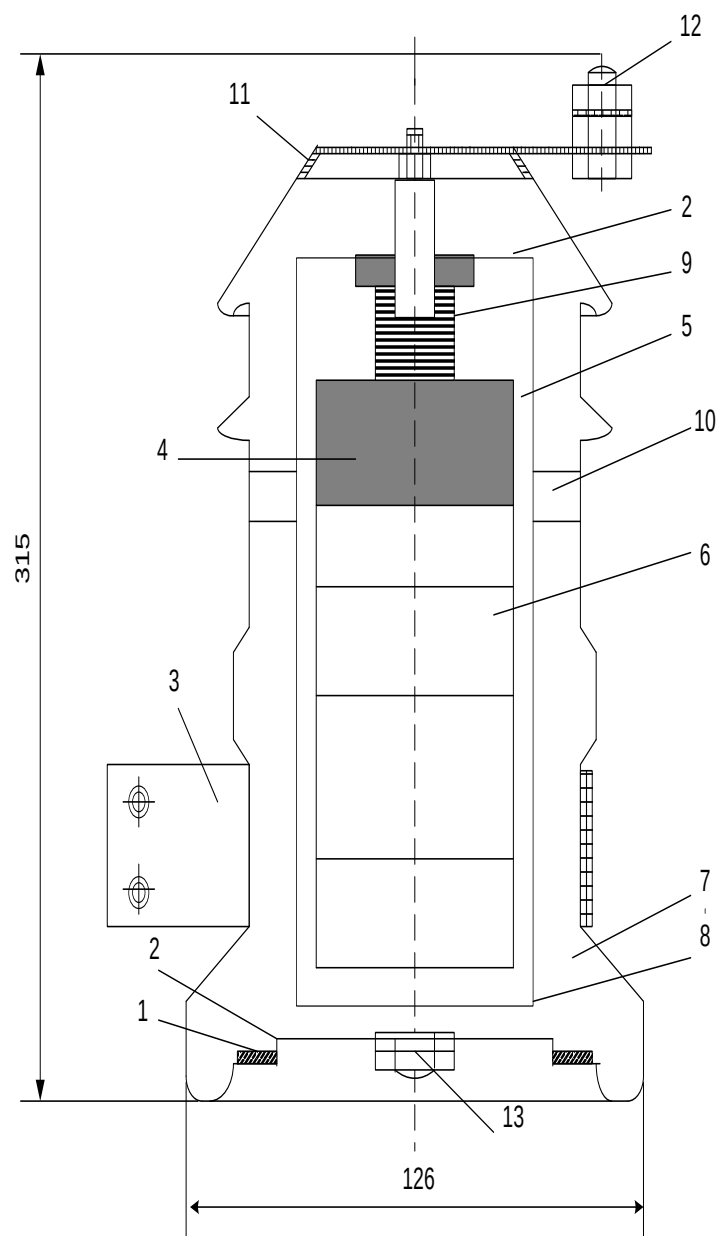
Корпусом РТ є ізоляційна трубка 1, виконана з газогенеруючого або матеріалу, що має внутрішню вставку з такого ж матеріалу. Один кінець трубки закритий металевою кришкою, що утримує внутрішній стрижневий електрод 2. На відкритому кінці трубки розташований інший електрод у виді кільця 3.



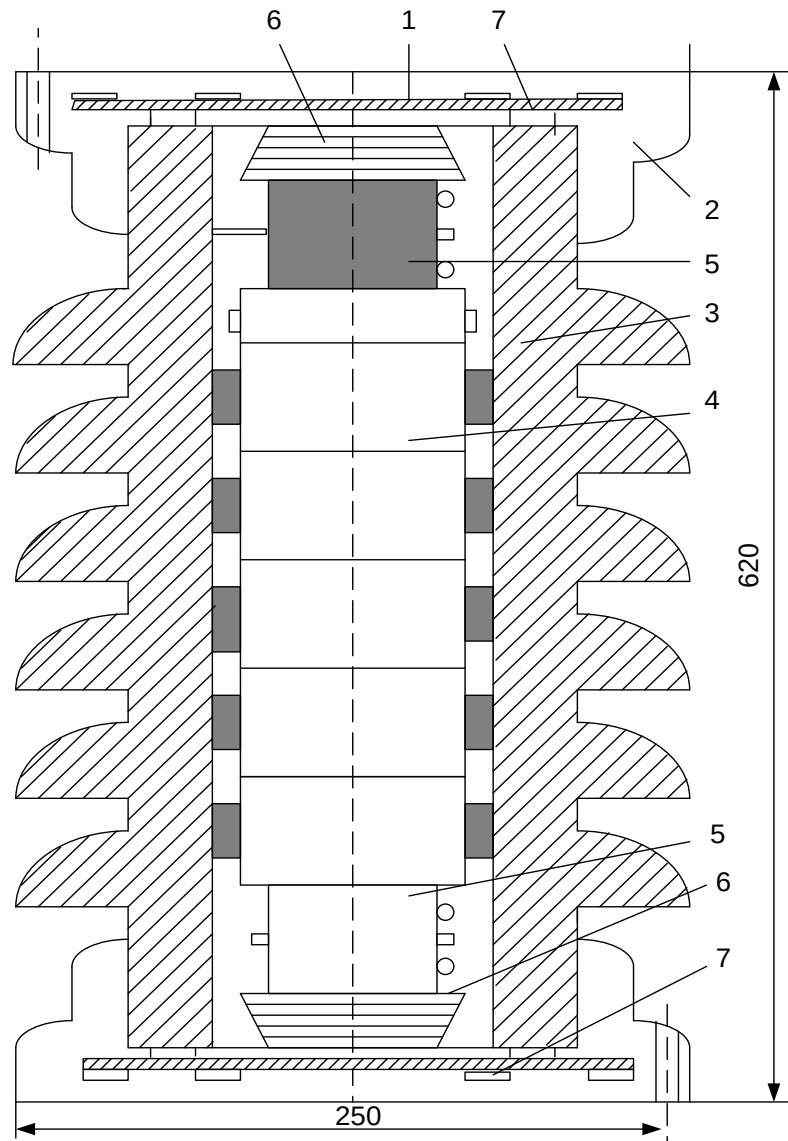
Конструкція одиничного іскрового проміжку з дугою, що обертається

ОПН (обмежувачі перенапруг нелінійний)





Вентильний розрядник РВП – 6



Вентильний розрядник PVC – 15

Висновки

У межах цієї роботи було проаналізовано конструктивні особливості різних типів розрядників, зокрема трубчастих (РТ), вентильних (ВТ) та обмежувачів перенапруг (ОПН). Для конкретної електричної мережі, розглянутої в третьому розділі, було обґрунтовано вибір таких типів розрядників: РВМГ, РВРД і РВМ.